



TESIS - TE142599

KONTROL ALIRAN DAYA SISTEM MANAGEMEN BATERAI DENGAN KONTROL DROOP PADA SISTEM PEMBANGKIT HIBRID PLTS-PLTB

ANDRI PRADIPTA
07111650010012

DOSEN PEMBIMBING
Dedet Candra Riawan, ST.,M.Eng.,Ph.D.
Dr. Ir. Soedibyo, M.MT.

PROGRAM MAGISTER
BIDANG KEAHLIAN TEKNIK SISTEM TENAGA
DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNOLOGI ELEKTRO
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2018



TESIS - TE142599

KONTROL ALIRAN DAYA SISTEM MANAGEMEN BATERAI DENGAN KONTROL DROOP PADA SISTEM PEMBANGKIT HIBRID PLTS-PLTB

ANDRI PRADIPTA

07111650010012

DOSEN PEMBIMBING

Dedet Candra Riawan, S.T.,M.Eng,Ph.D.

Dr. Ir. Soedibyo, M.MT.

PROGRAM MAGISTER

BIDANG KEAHLIAN TEKNIK SISTEM TENAGA

DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO

FAKULTAS TEKNOLOGI ELEKTRO

INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER

SURABAYA

2018

LEMBAR PENGESAHAN

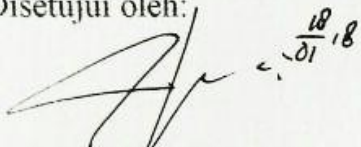
Tesis disusun untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar
Magister Teknik (M.T)
di
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

oleh:

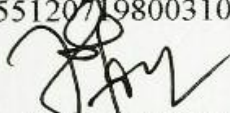
Andri Pradipta
NRP. 07111650010012

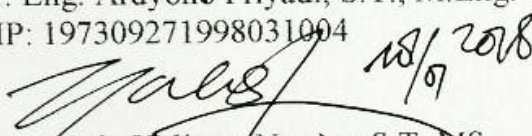
Tanggal Ujian : Desember 2017
Periode Wisuda : Maret 2018

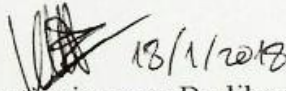
Disetujui oleh:


1. Dedet Candra Riawan, S.T., M.Eng., Ph.D (Pembimbing I)
NIP: 197311192000031001


2. Dr. Ir. Soedibyo, M.MT (Pembimbing II)
NIP: 195512071980031004


3. Dr. Eng. Ardyono Priyadi, S.T., M.Eng. (Penguji)
NIP: 197309271998031004


4. Dr. I Made Yulistya Negara, S.T., M.Sc. (Penguji)
NIP: 197007121998021001


5. Vita Lystrianingrum Budiharto Putri, S.T., M.Sc., Ph.D (Penguji)
NIP: 198208292006042001

Dekan Fakultas Teknologi Elektro



Dr. Tri Arief Sardjono, S.T., M.T.
NIP. 197002121995121001

Halaman ini sengaja dikosongkan

PERNYATAAN KEASLIAN TESIS

Dengan ini saya menyatakan bahwa isi keseluruhan tesis saya dengan judul **“KONTROL ALIRAN DAYA SISTEM MANAGEMEN BATERAI DENGAN KONTROL DROOP PADA SISTEM PEMBANGKIT HIBRID PLTS-PLTB”** adalah benar-benar hasil karya intelektual mandiri, diselesaikan tanpa menggunakan bahan-bahan yang tidak diijinkan dan bukan merupakan karya pihak lain yang saya akui sebagai karya sendiri.

Semua referensi yang dikutip maupun dirujuk telah ditulis secara lengkap pada daftar pustaka. Apabila ternyata pernyataan ini tidak benar, saya bersedia menerima sanksi sesuai peraturan yang berlaku.

Surabaya, 18 Januari 2018



Andri Pradipta

07111650010012

Halaman ini sengaja dikosongkan

KONTROL ALIRAN DAYA SISTEM MANAGEMEN BATERAI DENGAN KONTROL DROOP PADA SISTEM PEMBANGKIT HIBRID PLTS-PLTB

Nama mahasiswa : Andri Pradipta
NRP : 07111650010012
Pembimbing : 1. Dedet Candra Riawan, S.T.,M.Eng.,Ph.D
2. Dr. Ir. Soedibyo, M.MT.

ABSTRAK

Sistem pembangkit hibrid yang terdiri dari pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) dan pembangkit listrik tenaga angin (PLTB) dihubungkan paralel pada bus DC. Sistem hibrid tersebut membutuhkan sistem penyimpanan energi misalnya baterai untuk menyimpan kelebihan daya yang dibangkitkan oleh PLTS dan PLTB serta memberikan daya ke bus DC bila terjadi kekurangan daya untuk memperoleh keseimbangan daya. PLTS dan PLTB harus dioperasikan pada kondisi daya maksimal yang bisa dibangkitkan oleh pembangkit untuk memperoleh energi sebesar – besarnya. Disisi lain, konverter baterai harus memiliki sistem kontrol yang baik untuk meregulasi tegangan bus DC meskipun daya yang dihasilkan oleh pembangkit hibrid berfluktuasi sesuai kondisi iradiasi matahari dan kecepatan angin. Pada penelitian ini telah dirancang sistem kontrol aliran daya pada sistem hibrid PLTS dan PLTB dengan sistem kontrol *maksimum power point tracking* (MPPT). Sistem ini terintegrasi dengan sistem manajemen baterai (BMS) dengan sistem kontrol droop yang mampu menjaga tegangan bus DC tetap konstan. Simulasi dari sistem tersebut telah dilakukan dengan variasi iradiasi matahari, kecepatan angin dan beban. Efisiensi *tracking* menunjukkan kinerja kontrol MPPT untuk memaksimalkan daya PLTS dan PLTB, sementara respon dinamis dari tegangan bus DC menunjukkan kinerja kontrol droop yang mampu menjaga tegangan bus DC tetap konstan sesuai dengan regulasi yang telah dirancang.

Kata kunci: PLTS, PLTB, BMS, kontrol MPPT, kontrol droop.

Halaman ini sengaja dikosongkan

POWER FLOW CONTROL OF BATTERY MANAGEMEN SYSTEM USING DROOP CONTROL IN HYBRID PV – WIND POWER GENERATION SYSTEM

By : Andri Pradipta
Student Identity Number : 07111650010012
Supervisor(s) : 1. Dedet Candra Riawan, S.T.,M.Eng.,Ph.D
2. Dr. Ir. Soedibyo, M.MT.

ABSTRACT

Hybrid system including photoVoltaic (PV) and wind turbine generation system (WT) are connected in parallel on DC bus. Hibrid system proposed need energy storage system (ESS) for example battery to store excessive power generated by PV and WT and supply power into DC bus to obtain balance of power. PV and WT are operated in maximum power to get much power. In other word, converter of battery must have suitable control system to regulate DC bus Voltage. Although the power produced by hibrid system, it was fluctuated depend on irradiation of the sun and wind speed fluctuation. This research applied hybrid PV and WT generation system with maximum power point tracking (MPPT) control to get the maximum power. This system integrated with battery management system (BMS) with droop control to regulate DC bus Voltage. Simulation results are presented with various irradiation of the sun, wind speed and load. Tracking efficiency show the performance of MPPT control to get the maximum power of PV and WT. Dinamic responses of DC bus Voltage show the performance of droop control that can keep DC bus Voltage constanly corresponding with the regulation's design.

Keywords: PV, WT, BMS, MPPT control, droop control

Halaman ini sengaja dikosongkan

KATA PENGANTAR

Alhamdulillah Robbil 'Alamin, puji syukur kepada Allah Subhanahu wata'ala yang telah melimpahkan rahmat dan karunia-Nya, sehingga penulis diberikan kemudahan dalam menyelesaikan Tesis yang berjudul: ***Kontrol aliran daya sistem manajemen baterai dengan kontrol droop pada sistem hibrid PLTS-PLTB*** tepat pada waktunya. Tesis ini disusun dengan tujuan untuk memenuhi salah satu persyaratan untuk memperoleh gelar Magister Teknik pada Bidang Studi Sistem Tenaga, Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Institut Sepuluh Nopember Surabaya.

Penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Allah Subhanahu wata'ala dan Rasulullah Sallallahu 'alaihi wasalam
2. Segenap keluarga penulis, Ayahanda Sudariyanto dan Ibunda Samini, serta adik tercinta Hanafi atas segenap motifasi dan segala dukungan yang diberikan.
3. Bapak Dedet Candra Riawan, S.T.,M.Eng.,Ph.D dan Dr. Ir. Soedibjo, M.MT selaku dosen pembimbing penulis yang telah membimbing penulis, memberikan saran, dan bantuan, dan juga pengetahuan sehingga penulis dapat menyelesaikan tesis dengan baik dan lancar.
4. Keluarga besar Jurusan Teknik Elektro, baik para dosen, karyawan selama menjalani perkuliahan di ITS.
5. Keluarga besar Laboratorium Konversi Energi, Dosen, Mahasiswa S3, member S2, dan asisten laboratorium atas kerjasama dan dukungannya.
6. Teman-teman angkatan 2015, 2016 dan 2017 atas dukungan dan bantuannya.
7. Semua pihak yang terkait.

Penulis berharap semoga Tesis ini dapat memberi manfaat kepada pembaca yang dirahmati Allah. Terima kasih atas kritik dan saran dari pembaca untuk kemajuan penelitian mendatang.

Surabaya, 18 Januari 2018

Penulis

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN	iii
PERNYATAAN KEASLIAN TESIS	v
ABSTRAK	vii
<i>ABSTRACT</i>	ix
KATA PENGANTAR	xi
DAFTAR ISI.....	xiii
DAFTAR GAMBAR	xv
DAFTAR TABEL.....	xvii
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Tujuan	2
1.4 Batasan Masalah	2
1.5 Kontribusi	3
BAB 2 KAJIAN PUSTAKA.....	5
2.1 Kajian Penelitian Terkait	5
2.2 Teori Dasar.....	7
2.2.1 Sistem Pembangkit Hibrida Terkopel DC.....	7
2.2.2 Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS).....	8
2.2.3 Pembangkit Listrik Tenaga Angin	10
2.2.4 Konsep Droop	15
2.2.5 Konsep Droop Pada Sumber DC Paralel	16
2.2.6 Baterai	17
2.2.7 Kontrol MPPT Dengan Metode <i>Incremental Conductance</i>	19
BAB 3 PERANCANGAN DAN SIMULASI SISTEM	23
3.1 Perancangan sistem PLTS.....	23
3.1.1 Panel Surya	24
3.1.2 Perancangan Konverter Zeta Termodifikasi	25

3.2	Perancangan Sistem Pembangkit Tenaga Angin.....	28
3.2.1	Sistem Pembangkit Tenaga Angin	29
3.2.2	Perancangan Konverter Zeta dengan induktor kopel dan kapasitor	31
3.3	Sistem Manajemen Baterai.....	32
3.3.1	Perancangan konverter bidirectional.	33
3.4	Perancangan Regulasi Tegangan Droop.....	36
3.5	Penentuan konstanta PI dengan metode Ziegler Nicols.	38
BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN		41
4.1	Analisis Sistem Kontrol MPPT pada PLTS	41
4.1.1	Respon Perubahan Daya Akibat Perubahan Irradiasi Sinar Matahari	41
4.1.2	Ripple Daya Steady State	42
4.1.3	Efisiensi Tracking MPPT Incremental Conductance	43
4.2	Analisis Sistem Kontrol MPPT pada PLTB.....	44
4.2.1	Respon Perubahan Daya Akibat Perubahan Kecepatan Angin	44
4.2.2	Ripple Daya PLTB dengan Kontrol MPPT.....	45
4.2.3	Efisiensi Tracking Kontrol MPPT pada PLTB.....	47
4.3	Analisis Sistem Kontrol Droop pada BMS	47
4.3.1	Respon Daya Sistem Saat Mode Charging dan Discharging	48
4.3.2	Respon Tegangan Bus DC.....	50
4.3.3	Perbandingan Perancangan Dengan Hasil Simulasi.....	51
BAB 5 PENUTUP		55
5.1	Kesimpulan.....	55
5.2	Saran.....	55
DAFTAR PUSTAKA.....		57
DAFTAR RIWAYAT HIDUP		59
LAMPIRAN		61

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1	Sistem kontrol baterai terintegrasi pada bus DC	5
Gambar 2. 2	Kurva kontrol droop dan arus konstan pada konverter bidirectional	6
Gambar 2. 3	Sistem pembangkit hibrid terkopel DC	8
Gambar 2. 4	Rangkaian ekivalen sel photovoltaik.....	8
Gambar 2. 5	Karakteristik V-I pada PV cell	10
Gambar 2. 6	Sistem pembangkit listrik tenaga angin	11
Gambar 2. 7	Kurva koefisien daya (C_p) dan koefisien torsi (C_t) terhadap lamda untuk PLTBG yang berbeda	12
Gambar 2. 8	Rangkaian ekivalen generator sinkron magnet permanen.....	13
Gambar 2. 9	Rangkaian penyearah gelombang penuh 3 fasa	14
Gambar 2. 10	Kurva speed droop pada mesin sinkron	15
Gambar 2. 11	Kurva droop pada pembebanan kerja paralel 2 pembangkit	16
Gambar 2. 12	Rangkaian pengganti 2 sumber DC yang terhubung paralel.....	17
Gambar 2. 13	Kurva droop pada 2 buah sumber DC dengan R_d berbeda.	17
Gambar 2. 14	Model Trembly baterai generik non linier	18
Gambar 2. 15	Data tegangan pada discharge dengan arus konstan	19
Gambar 2. 16	Grafik tegangan discharge baterai	19
Gambar 2. 17	Grafik daya (P) vs tegangan (V) pada algoritma IC	20
Gambar 2. 18	Flowchart algoritma <i>incremental conductance</i> (IC)	21
Gambar 3. 1	Sistem hibrid yang diajukan.....	23
Gambar 3. 2	Konfigurasi sistem panel surya	24
Gambar 3. 3	Kurva karakteristik I-V	25
Gambar 3. 4	Kurva karakteristik P-V	25
Gambar 3. 5	Rangkaian konverter zeta dengan induktor kopel dan kapasitor....	26
Gambar 3. 6	Sistem pembangkit listrik tenaga angin	28
Gambar 3. 7	Kurva karakteristik daya elektrik vs kecepatan sudut rotor	30
Gambar 3. 8	Pemodelan baterai pada PSIM	33
Gambar 3. 9	Topologi rangkaian bidirectional buck-boost konverter	33
Gambar 3. 10	Rangkaian konverter bidirectional, a)mode boost ; b)mode buck .	34
Gambar 3. 11	Rancangan regulasi tegangan droop.....	36

Gambar 3. 12 Diagram kontrol pada a) konverter PLTS; b) konverter PLTB	37
Gambar 3. 13 Diagram kontrol konverter buck–boost bidirectional pada BMS...	38
Gambar 3. 14 Respon tegangan bus DC saat terjadi perubahan duty cycle	39
Gambar 3. 15 Penentuan batas – batas L dan T respon tegangan pada metode Ziegler Nicols metode 1	39
Gambar 3. 16 Penentuan batas – batas L dan T respon tegangan pada metode Ziegler Nicols metode 2	40
Gambar 4. 1 Respon perubahan a) irradiansi matahari; b) daya keluaran panel....	42
Gambar 4. 2 Ripple daya keluaran panel surya dengan kontrol MPPT pada iradiansi : a) 1000 W/m ² ; b) 500 W/m ² ; c) 300 W/m ²	43
Gambar 4. 3 a) Perubahan kecepatan angin; b) Respon daya keluaran PLTB	45
Gambar 4. 4 Ripple daya keluaran PLTB dengan kontrol MPPT ketika kecepatan angin, a) 7 m/s; b) 6 m/s; c) 5 m/s.....	46
Gambar 4. 5 Respon aliran daya sistem ketika P_{in} konstan dan beban berubah..	48
Gambar 4. 6 a) perubahan irradiansi matahari; b) perubahan kecepatan angin; c) respon aliran daya sistem ketika P_{in} berubah dan beban tetap; d) tegangan bus DC.....	49
Gambar 4. 7 Respon tegangan saat P_{in} tetap beban berubah dengan a.) $R_d =$ -9,1884; b.) $R_d = -4,7339$	50
Gambar 4. 8 Hasil simulasi; a.) sampel respon aliran daya baterai; b.) sampel respon tegangan bus DC.	52
Gambar 4. 9 Perbandingan antara perancangan dengan hasil simulasi	53

DAFTAR TABEL

Tabel 3. 1	Spesifikasi panel surya.....	24
Tabel 3. 2	Spesifikasi konverter DC-DC PLTS	26
Tabel 3. 3	Spesifikasi sistem turbin angin	29
Tabel 3. 4	Spesifikasi PMSG	29
Tabel 3. 5	Spesifikasi konverter DC-DC PLTB	30
Tabel 3. 6	Data charge discharge baterai SGL100.....	32
Tabel 3. 7	Spesifikasi bidirectional konverter mode boost	34
Tabel 3. 8	Spesifikasi bidirectional konverter mode buck	35
Tabel 3. 9	Perancangan regulasi tegangan bus DC	36
Tabel 3. 10	Penentuan kontanta parameter Ziegler Nicols	38
Tabel 4. 1	Efisiensi kontrol MPPT pada PV dengan algoritma IC variabe.....	44
Tabel 4. 2	Efisiensi kontrol MPPT pada PLTB dengan algoritma incremental conductance.....	46
Tabel 4. 3	Pengukuran daya dan tegangan hasil simulasi di beberapa titik	51

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pertambahan jumlah penduduk, perkembangan teknologi dan meningkatnya aktifitas industri menyebabkan kebutuhan energi listrik di Indonesia meningkat 3% per tahun [1]. Sementara keterbatasan cadangan energi fosil seperti batu bara, minyak bumi dan gas, mengharuskan pemerintah membuat kebijakan dan strategi pengembangan energi baru terbarukan (EBT) dan konservasi energi untuk memenuhi target kebijakan energi nasional di tahun 2025 yaitu penggunaan EBT adalah sebesar 23% berdasarkan RUEN EBT [2].

Indonesia memiliki potensi EBT yang melimpah diantaranya panas bumi, biomassa, sinar matahari, angin, mikrohidro, air laut, sampah, dll. namun pemanfaatannya sangat minim. Sementara capaian rasio elektrifikasi perusahaan listrik negara (PLN) pada Juni tahun 2017 adalah 92,8% [3]. Sebagian besar wilayah yang belum menerima distribusi listrik dari jaringan PLN adalah kawasan kepulauan dan daerah pinggiran yang letaknya jauh dari jangkauan sistem transmisi dan distribusi PLN (*off-grid*). Dalam memenuhi target tersebut, maka pemerintah membuat kebijakan terobosan melalui pembangunan pembangkit listrik dari EBT. Perancangan sistem hybrid dengan memanfaatkan potensi sumber energi terbarukan di kawasan kepulauan dan daerah pinggiran adalah pilihan yang paling cocok untuk memenuhi target pemerintah dalam program bauran energi nasional dan meningkatkan rasio elektrifikasi.

Salah satu permasalahan utama dalam merancang sistem hibrid adalah merancang sistem kontrol yang efektif dan efisien. Kriteria sistem kontrol yang efektif untuk diterapkan pada pembangkit EBT adalah mampu memaksimalkan daya pembangkitan. Kriteria sistem kontrol yang efisien adalah mampu menghasilkan efisiensi kontrol yang baik. Selain itu dibutuhkan sistem penyimpanan energi yang mampu mengatasi masalah kelebihan maupun kekurangan daya pada sistem hibrid serta mampu menjaga kualitas daya sistem.

Beberapa penelitian terkait sistem kontrol pembangkit hibrid telah dilakukan [4]-[9]. Pada penelitian ini akan dirancang sistem kontrol pembangkit hibrid PLTS, PLTB dan BMS terkopel DC yang akan fokus pada sistem kontrolnya. Terdapat beberapa penelitian sebelumnya terkait strategi kontrol yang digunakan pada sistem hibrid yang dijadikan sebagai referensi pada penelitian ini.

1.2 Rumusan Masalah

Integrasi sistem PLTS dan PLTB dengan daya masukan dan beban yang fluktuatif akan menimbulkan ketidakstabilan tegangan pada bus DC. Untuk mengatasi hal tersebut dibutuhkan sistem penyimpanan energi sekaligus mampu memberi kekurangan daya pada sistem. Sehingga dipilih baterai untuk meregulasi daya dan tegangan pada sistem tersebut.

Terdapat salah satu sistem kontrol yang dapat melakukan regulasi terhadap daya dan tegangan pada sistem bus DC, sistem kontrol tersebut dinamakan kontrol droop. Sistem ini terbentuk dari kurva hubungan antara daya dan tegangan yang dapat didesain sesuai dengan kebutuhan regulasi pada sistem.

1.3 Tujuan

Tujuan dari penelitian pada tesis ini adalah :

1. Memaksimalkan daya dari pembangkit hibrid untuk disalurkan pada Bus DC.
2. Memberi masukan daya bila terjadi kekurangan daya masukan dari pembangkit hibrid dan menjaga tegangan bus DC konstan sesuai dengan regulasi yang ditentukan.

1.4 Batasan Masalah

Penelitian ini akan dibatasi pada :

1. Sistem pembangkit hibrid terdiri dari PLTS, PLTB, baterai dan beban.
2. Kualitas daya yang ingin dicapai adalah tegangan konstan pada bus DC sesuai dengan regulasi.
3. Konverter yang digunakan adalah konverter ideal.

1.5 Kontribusi

Kontribusi penulis pada tesis ini adalah :

1. Sebagai referensi untuk membangun sistem kontrol pembangkit hibrid untuk dapat diterapkan pada penelitian mendatang maupun proyek pengembangan pembangkit listrik energi terbarukan.
2. Integrasi pembangkit hibrid PLTS, PLTB dan baterai pada bus DC.

Halaman ini sengaja dikosongkan

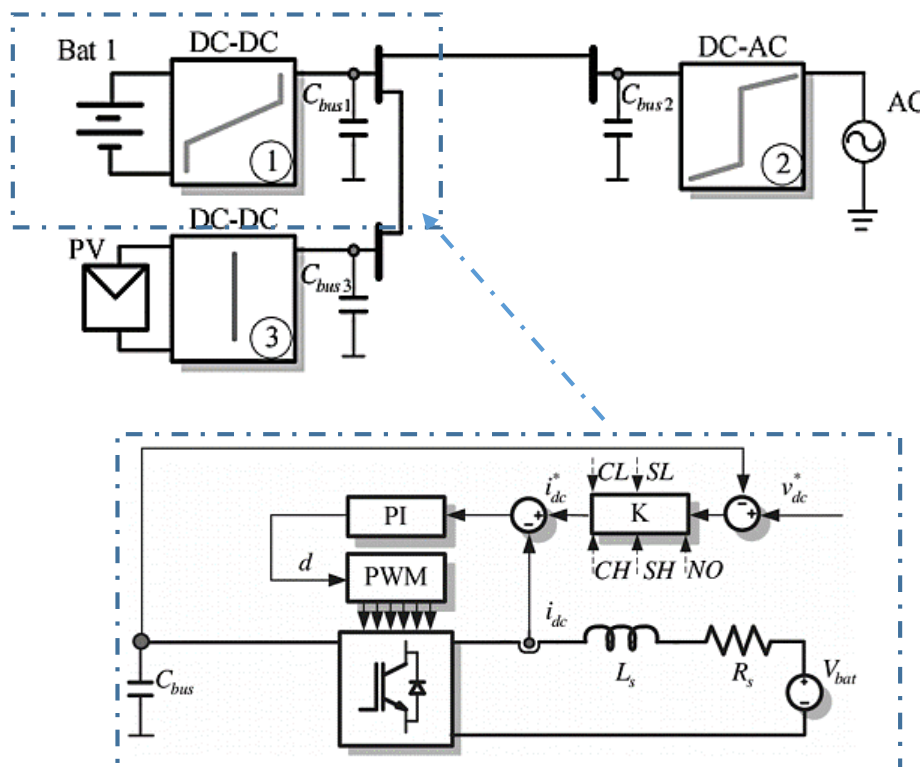
BAB 2

KAJIAN PUSTAKA

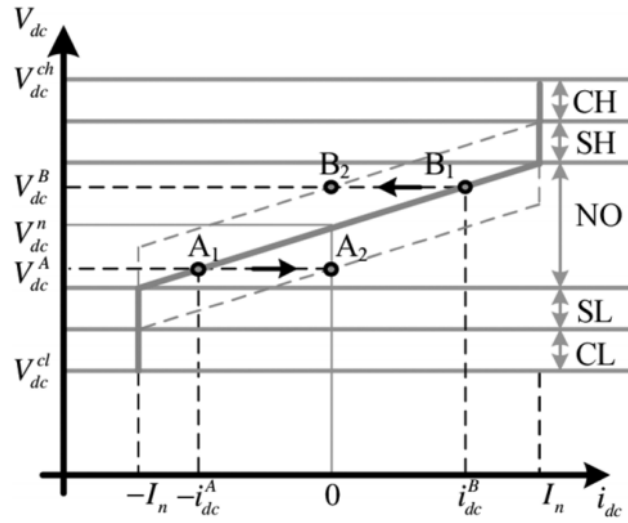
Untuk mendukung penelitian ini terdapat beberapa penelitian terkait kontrol aliran daya pada pembangkit hibrid dan BMS serta teori penunjang yang disajikan pada bab ini sebagai bahan referensi.

2.1 Kajian Penelitian Terkait

Beberapa penelitian terkait yang sudah dilakukan diantaranya : menerapkan sebuah prioritas desentralisasi dengan strategi kontrol *adaptive droop* untuk sistem kontrol pada multiterminal bus DC yang terintegrasi baterai [4]. Bus DC ini terdiri dari baterai, PLTS, dan sumber AC yang ditunjukkan pada gambar 2.1. Pada teknik kontrol baterai terdapat 2 mode kontrol yaitu mode kontrol droop dan mode arus konstan. Kedua mode ini dibatasi oleh arus maksimal baterai. Prinsip teknik kontrol baterai dengan kedua mode ini ditunjukkan pada gambar 2.2.



Gambar 2. 1 Sistem kontrol baterai terintegrasi pada bus DC [4]



Gambar 2. 2 Kurva kontrol droop dan arus konstan pada konverter bidirectional [4]

Pada titik A1, terjadi kekurangan daya pada sistem yang ditandai dengan $V_{dc \text{ bus}} < V_{dc}^n$ (V_{dc} nominal), sehingga baterai dalam kondisi discharging dengan arus sebesar $-I_{dc}^A$. Pada titik A2, baterai dalam kondisi *standby*. Pada titik B1, terjadi kelebihan daya sistem yang ditandai dengan $V_{bus \text{ DC}} > V_{dc}^n$, sehingga baterai dalam kondisi charging dengan arus sebesar I_{dc}^B . Pada titik B2, baterai dalam kondisi *standby*. CH (*Critical High*) menunjukkan kondisi pembuangan kritis, SH (*Safety High*) menunjukkan kondisi pembuangan aman, NO (*Normal Operation*) menunjukkan operasi normal, SL (*Safety High*) menunjukkan kondisi pengisian aman dan CL (*Critical low*) kondisi pengisian kritis.

Terdapat beberapa strategi pengendalian yang digunakan dalam sistem hibrida [5]–[7] seperti mengintegrasikan sistem pembangkit tenaga matahari dan angin dengan beberapa sistem penyimpanan energi baterai yang sudah dibahas [8]. Baterai digunakan untuk menghaluskan fluktuasi daya yang dihasilkan oleh sistem pembangkit PLTS dan PLTB berdasarkan kondisi *state of charge* (SOC) masing-masing baterai. Masalah *smoothing* diformulasikan berdasarkan tingkat fluktuasi daya untuk mengevaluasi pengaruh kontrol daya PLTS dan PLTB.

Pengendalian adaptif pada microgrid DC dengan kontrol droop yang terintegrasi dengan BMS telah dibahas [9]. Kontrol yang diusulkan adalah kontrol ganda dengan kontrol supervisor dengan tingkat yang lebih tinggi yang dapat diimplementasikan melalui antarmuka komunikasi dengan bandwidth rendah. mode transisi dikendalikan oleh kontrol supervisor dengan perhitungan droop adaptif dan estimasi SOC. Tujuan utama dari kontrol yang diusulkan adalah untuk menghindari fluktuasi tegangan yang tinggi dan mengatur pengisian untuk 2 baterai.

Pengendalian aliran daya pada mikrogrid DC tegangan rendah berbasis panel surya dengan sistem manajemen baterai telah dilakukan [10]. Sistem tersebut menerapkan beberapa mode dalam setiap konverter panel surya dan baterai, yaitu untuk mode operasi MPPT dan droop. Daya maksimum diperoleh dari panel surya saat konverter beroperasi pada mode MPPT. Bila permintaan beban lebih kecil dari daya panel surya dan baterai dalam kondisi penuh, mode operasi konverter panel surya akan berubah menjadi mode operasi droop agar tegangan bus DC tetap konstan.

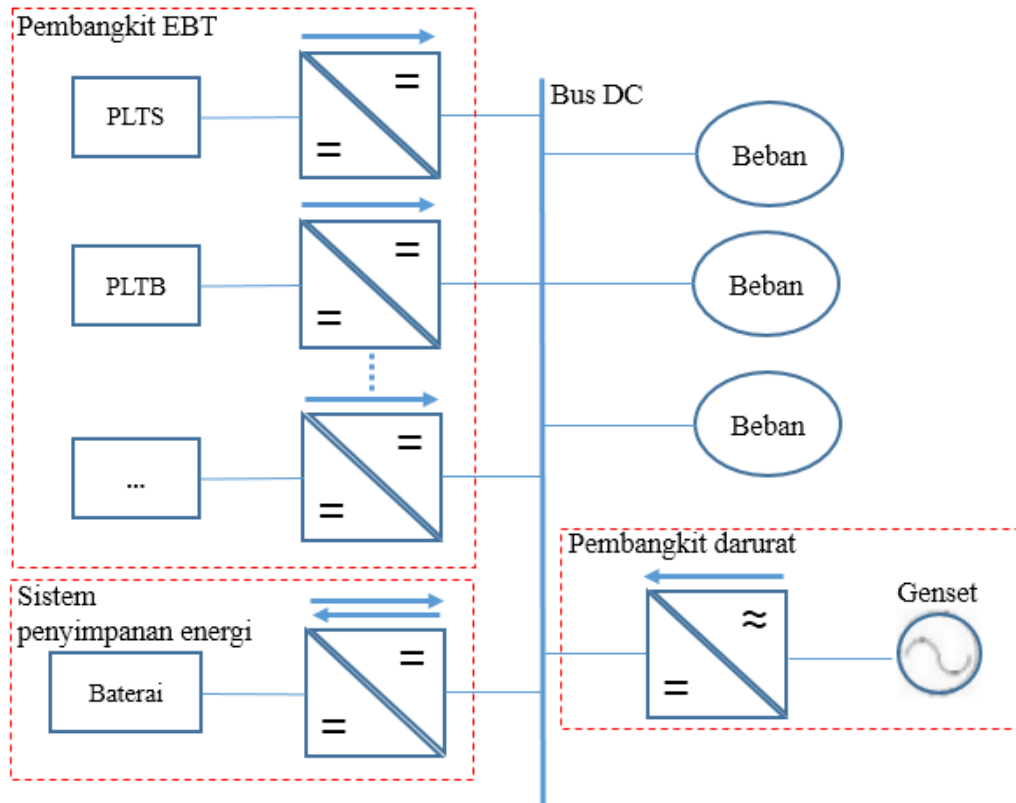
2.2 Teori Dasar

Terdapat beberapa teori dasar terkait penelitian yang akan dilakukan diantaranya :

2.2.1 Sistem Pembangkit Hibrida Terkopel DC

Sistem pembangkit hibrida terkopel DC merupakan gabungan beberapa pembangkit tenaga listrik dalam suatu bus DC. Sistem pembangkit gabungan tersebut terdiri dari pembangkit EBT, pembangkit darurat ,sistem penyimpanan energi dan beban seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.3. Beberapa yang termasuk pembangkit EBT diantaranya PLTS, PLTB, mikrohidro, fuelcell dll. Pembangkit darurat adalah jenis pembangkit yang dapat beroperasi dengan cepat disaat terjadi kekurangan energi yang tidak dapat dipenuhi oleh sistem penyimpanan energi, contohnya genset. Sistem penyimpanan energi digunakan

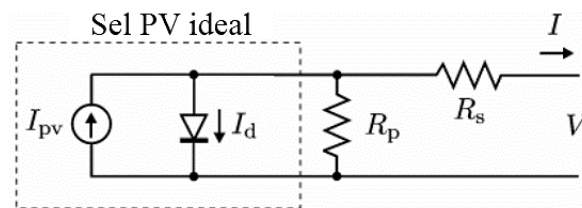
untuk menyimpan kelebihan energi yang dihasilkan oleh pembangkit EBT dan memberi masukan daya disaat terjadi kekurangan energi, contohnya baterai.



Gambar 2. 3 Sistem pembangkit hibrid terkopel DC

2.2.2 Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS)

PLTS merupakan pembangkit energi baru terbarukan yang memanfaatkan energi sinar matahari untuk menghasilkan listrik yang sering disebut panel surya. Panel surya terdiri dari susunan sel photovoltaik. Sebuah sel photovoltaik (PV) dapat direpresentasikan menjadi sumber arus I_{pv} dengan sebuah diode yang terhubung paralel yang ditunjukkan pada gambar 2.4.



Gambar 2. 4 Rangkaian ekivalen sel photovoltaik [11]

Tegangan keluaran dan arus keluaran dari sel PV dapat dimodelkan menjadi :

$$I = I_{pv} - I_d \quad (2.1a)$$

$$I_d = I_0 (e^{\frac{qV}{akT}} - 1) \quad (2.1b)$$

I adalah arus sel PV, I_{pv} adalah arus yang dihasilkan oleh sel PV, I_d adalah arus diode Shockley, I_0 adalah arus reverse saturasi, q adalah muatan elektron ($1,60217646 \times 10^{-19}$), a adalah faktor ideal diode, k adalah konstanta Boltzman ($1,3806503 \times 10^{-23}$), T adalah suhu, V adalah tegangan p-n junction diode, R_s adalah resistansi seri, R_p adalah resistansi paralel.

Modul PV adalah gabungan beberapa sel PV yang dihubungkan seri dan paralel untuk mendapatkan tegangan yang tinggi sementara array PV adalah modul PV yang dihubungkan seri dan kemudian dihubungkan paralel. Analisis dari sel PV terdapat 2 rugi - rugi pada sel PV yaitu rugi - rugi arus bocor yang direpresentasikan oleh R_p dan rugi-rugi semikonduktor yang direpresentasikan oleh R_s . Nilai dari R_s dan R_p diperoleh dari persamaan 2.3 yang dirumuskan sebagai berikut :

$$R_p = \frac{V + IR_s}{I_{pv} - I - I_0 [e^{\frac{qV_d}{akT}} - 1]} \quad (2.3)$$

Arus reverse saturasi ditentukan oleh perubahan suhu yang dirumuskan sebagai berikut :

$$I_{pv} = I_{pv}(T_1) + K_0(T - T_1) \quad (2.4)$$

$$K_0 = \frac{I_{sc}(T_2) - I_{sc}(T_1)}{T_2 - T_1} \quad (2.5)$$

$$I_0 = I_0(T_1) \left(\frac{T}{T_1} \right)^{3/n} \left(e^{\frac{qV_d T_1}{nk(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_1})}} \right) \quad (2.6)$$

$$I_0(T_1) = \frac{I_{sc}(T_1)}{e^{\frac{qV_{oc} T_1}{nkT_1}} - 1} \quad (2.7)$$

Ketika PV menerima irradiasi matahari, akan dibangkitkan arus PV dan daya yang dibangkitkan akan proporsional terhadap perubahan irradiasi.

$$I_{pv}(T_1) = I_{sc}(T_1, G_{nom}) \times \frac{G}{G_{nom}} \quad (2.8a)$$

$$I_{pv}(T_2) = I_{sc}(T_2, G_{nom}) \times \frac{G}{G_{nom}} \quad (2.8b)$$

Keterangan :

$I_{pv}(T_1)$ = arus pembangkitan PV pada suhu $T_1 = 25^\circ$

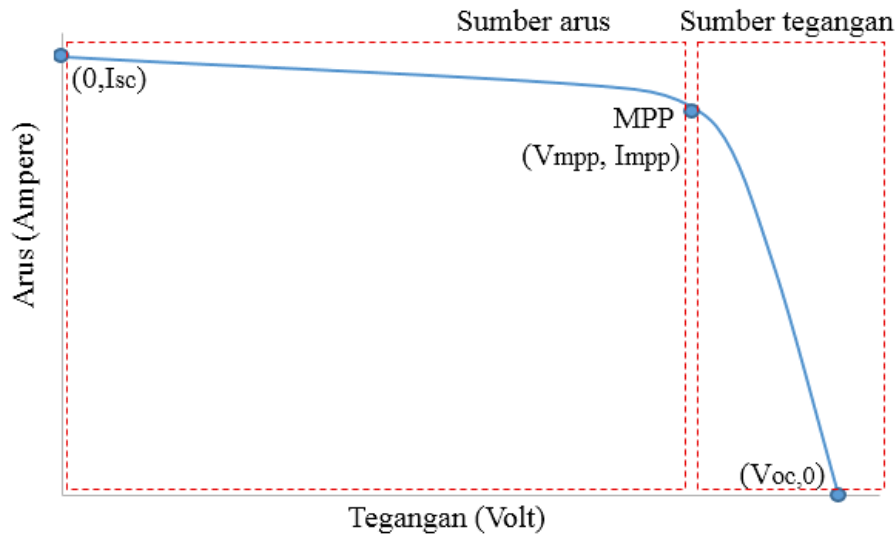
$I_{pv}(T_2)$ = arus pembangkitan PV pada suhu T_2°

G_{nom} = irradiasi dari 1000 W/m^2

G = irradiasi

I_{sc} = arus hubung singkat pada suhu 25° dan pada saat 1000 W/m^2

Untuk karakteristik V-I dari PV ditunjukkan pada gambar 2.5.

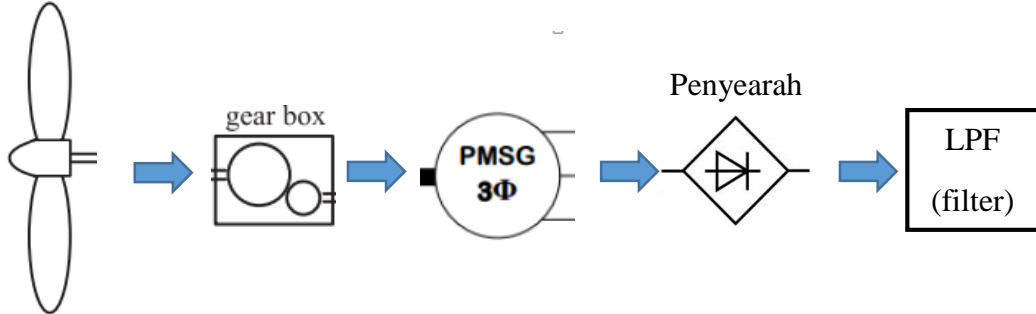


Gambar 2. 5 Karakteristik V-I pada sel PV [11]

2.2.3 Pembangkit Listrik Tenaga Angin

Konsep Pembangkit listrik tenaga angin yaitu memanfaatkan energi angin untuk memutar turbin angin yang dikopel dengan generator untuk mengkonversi energi gerak menjadi energi listrik. Beberapa komponen yang digunakan pada

sistem pembangkit listrik tenaga angin adalah turbin angin, gearbox, generator sinkron magnet permanen, penyearah dan filter. Struktur pembangkit listrik tenaga angin ditunjukkan pada gambar 2.6.



Gambar 2. 6 Sistem pembangkit listrik tenaga angin

2.2.3.1 Turbin Angin

Daya dan torsi mekanik yang dihasilkan oleh turbin angin dituliskan dengan persamaan berikut :

$$P_m = \frac{1}{2} \rho \pi R_b^2 V_a^3 C_p \quad (2.9a)$$

$$T_m = \frac{1}{2} \rho \pi R_b^3 V_a^2 C_T \quad (2.9b)$$

$$C_T = C_p / \lambda \quad (2.9c)$$

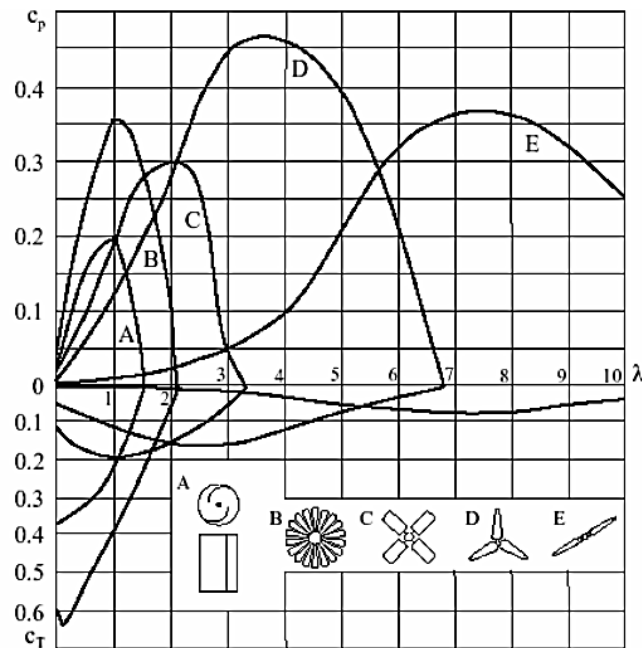
$$\lambda = \frac{R_b \omega_r}{V_a} \quad (2.9c)$$

ρ adalah densitas udara (kg/m^3), πR_b^2 adalah luas area sapuan sudu rotor (m^2), R_b adalah jari – jari rotor, V_a adalah kecepatan angin (m/s), C_p dan C_T adalah koefisien daya dan torsi rotor pada turbin angin dalam mengkonversi energi angin menjadi energi gerak yang sering disebut batas Betz yaitu 0,59. λ adalah *tip speed ratio* dan ω_r adalah kecepatan putar rotor (rad/s).

Hubungan antara daya, torsi dan kecepatan putaran yang dihasilkan oleh turbin angin juga dapat dituliskan dengan persamaan berikut :

$$T_m = \frac{P_m}{\omega_r} \quad (2.10)$$

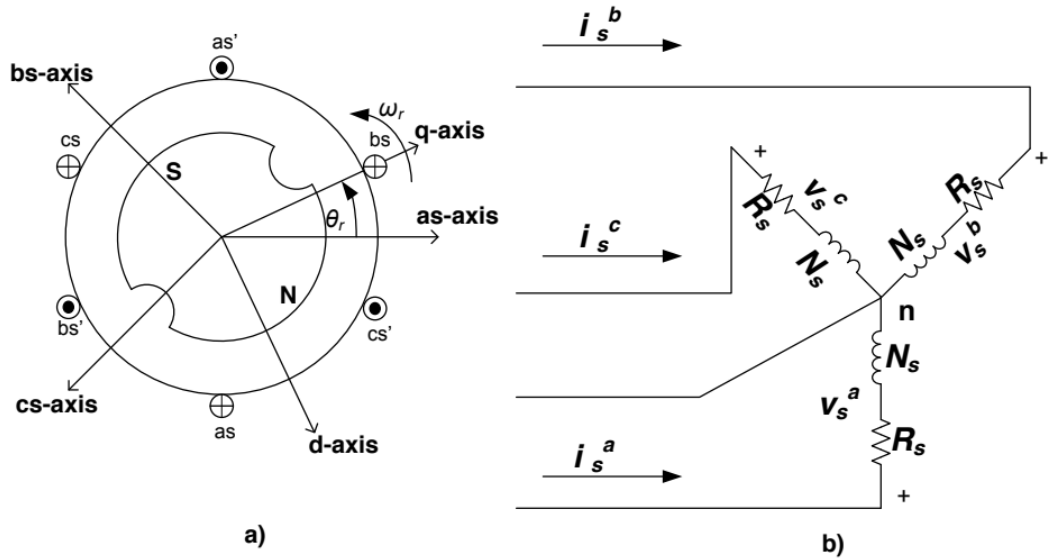
Setiap jenis turbin angin memiliki karakteristik yang berbeda. Karakteristik koefisien daya dan torsi turbin angin ditunjukkan pada gambar 2.7.



Gambar 2. 7 Kurva koefisien daya (C_p) dan koefisien torsi (C_t) terhadap lamda untuk PLTBG yang berbeda [12]

2.2.3.2 Generator Sinkron Magnet Permanen

Generator sinkron magnet permanen (PMSG) merupakan generator yang menggunakan magnet permanen untuk sistem eksitasi (menghasilkan medan magnet). Prinsip kerja dari generator ini adalah menggunakan magnet permanen yang dipasang pada sisi rotor untuk menghasilkan medan magnet yang akan membentuk medan magnet putar seiring dengan putaran rotor yang akan memotong kumparan jangkar pada sisi stator sehingga timbul ggl (gaya gerak listrik) pada kumparan jangkar. Rangkaian ekivalen dari PMSG ditunjukkan pada gambar 2.8.



Gambar 2. 8 Skema rangkaian ekivalen PMSG

Pemodelan dari PMSG mengacu pada skema yang ditunjukkan pada gambar 2.8. Persamaan tegangan di sisi stator dirumuskan pada persamaan 2.12. nilai x menunjukkan fasa a, b atau c.

$$v_s^x = R_s i_s^x + \frac{d\lambda_s^x}{dt} \quad (2.12a)$$

Mengacu pada nilai $\lambda = L \cdot i$ dan menggunakan transformasi d-q, model PMSG pada referensi sinkron dapat dirumuskan pada persamaan 2.13a dan 2.13b.

$$v_s^{dr} = R_s i_s^{dr} + L_d \frac{di_s^{dr}}{dt} + \omega_r L_q i_s^{qr} + \omega_r \lambda_m^{lr} \quad (2.12b)$$

$$v_s^{qr} = R_s i_s^{qr} + L_q \frac{di_s^{qr}}{dt} - \omega_r L_d i_s^{dr} \quad (2.12c)$$

Subscripts s dan r menunjukkan variabel dan parameter pada stator dan rotor, v^{qr} dan v^{dr} adalah tegangan pada d-q *reference frame*, R_s resistansi stator, L_q dan L_d adalah induktansi belitan pada q dan d axis, i^{qr} dan i^{dr} menunjukkan arus pada d-q *reference frame*, ω_r adalah frekuensi angular rotor dan λ_m^{lr} adalah amplitudo dari fluk linkages yang dihasilkan oleh magnet permanen. Frekuensi angular rotor dapat dituliskan pada persamaan 2.12d.

$$\omega_r = \frac{P\omega_m}{2} \quad (2.12d)$$

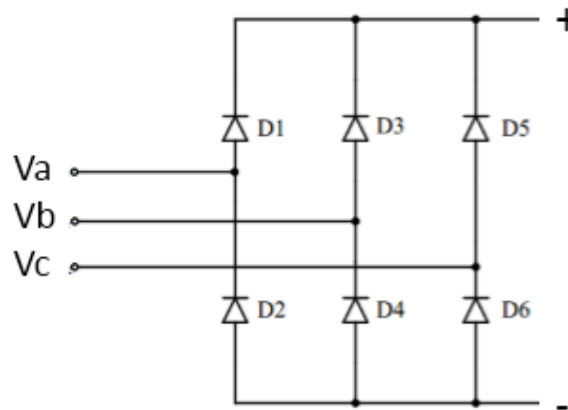
Penjelasan yang lebih detail dari persamaan dinamis model mesin sinkron dapat dilihat pada referensi [13]. Torsi elektrik pada rotor dimodelkan dengan persamaan 2.13a. Torsi elektrik dan frekuensi angular rotor akan menentukan besarnya daya mekanis rotor seperti yang ditunjukkan pada persamaan 3.13b.

$$T_e = \frac{3}{4} P \{ (L_q - L_d) i_s^{dr} i_s^{qr} + \lambda_m^{lr} i_s^{dr} \} \quad (2.13)$$

$$P_m = T_e \omega_m \quad (2.14)$$

2.2.3.3 Penyearah

Penyearah adalah konverter yang mengubah tegangan dan arus bolak – balik (AC) menjadi tegangan dan arus searah (DC). Komponen yang digunakan pada penyearah adalah dioda. Penyearah dibagi menjadi 2 secara konfigurasi yaitu penyearah setengah gelombang dan penyearah gelombang penuh. Dalam penelitian ini digunakan penyearah gelombang penuh 3 fasa dikarenakan generator sinkron magnet permanen yang digunakan adalah generator 3 fasa. Rangkaian penyearah gelombang penuh 3 fasa ditunjukkan pada gambar 2.9.



Gambar 2. 9 Rangkaian penyearah gelombang penuh 3 fasa

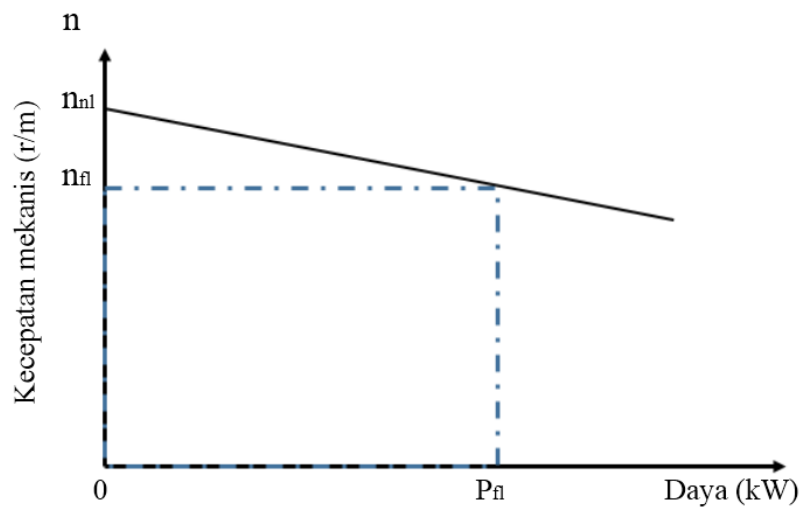
Rumus tegangan keluaran rata - rata dari penyearah gelombang penuh 3 fasa dirumuskan sebagai berikut :

$$V_{ave} = \frac{3\sqrt{3}V_m}{\pi} \quad (2.15)$$

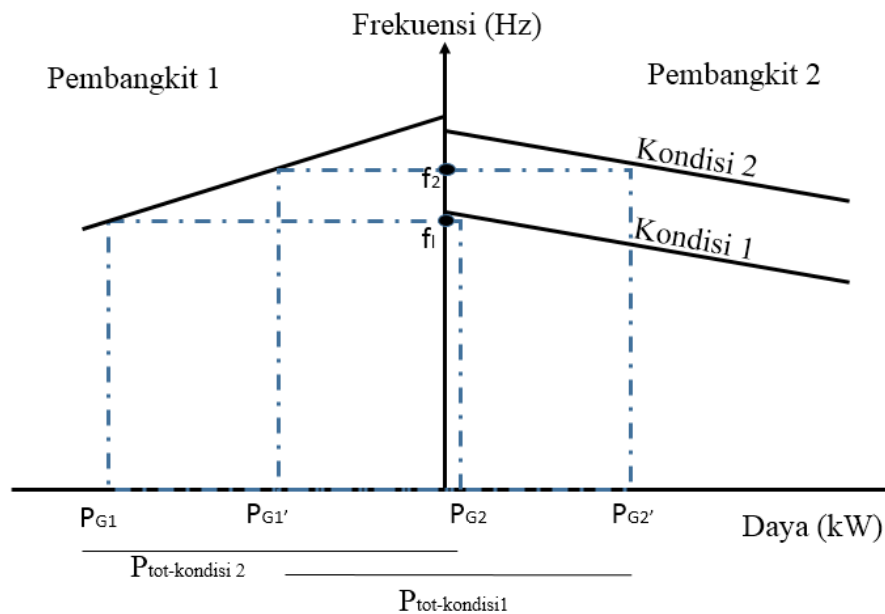
V_{ave} adalah tegangan keluaran rata – rata dan V_m adalah amplitudo maksimal tegangan AC

2.2.4 Konsep Droop

Konsep droop diambil dari prinsip kurva droop pada mesin sinkron. Kurva droop ini direpresentasikan dengan kurva antara daya keluaran (kW) terhadap kecepatan mekanik (rpm) mesin sinkron yang ditunjukkan pada gambar 2.10. n_{nl} merupakan kecepatan mekanis saat kondisi tanpa beban, n_{fl} merupakan kecepatan mekanis saat kondisi beban penuh dan P_{fl} merupakan daya saat kondisi beban penuh. Ketika terjadi perubahan daya keluaran maka akan menyebabkan perubahan kecepatan mekanik dari mesin sinkron.



Gambar 2. 10 Kurva speed droop pada mesin sinkron

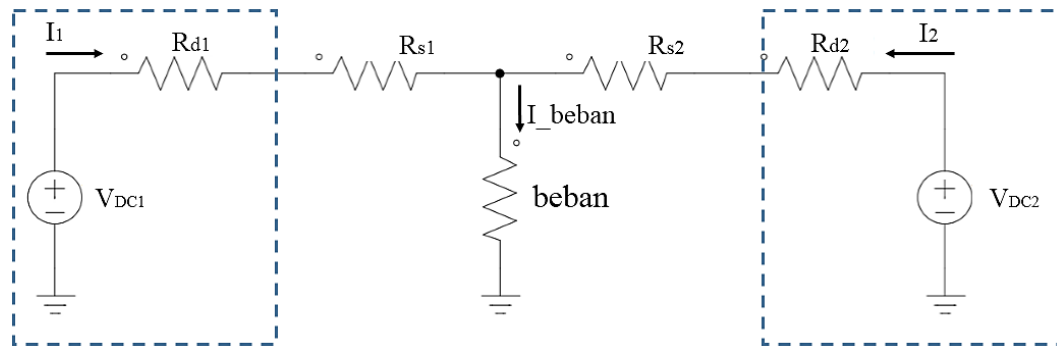


Gambar 2. 11 Kurva droop pada pembebanan kerja paralel 2 pembangkit

Masing - masing mesin sinkron memiliki karakteristik droop tersendiri. Dalam kerja paralel mesin sinkron kurva droop ini digunakan untuk mengatur pembebanan pada masing - masing mesin sinkron. Ketika dua buah generator sinkron diparalel maka pembebanan tiap generator ditentukan oleh kurva droop yang menghasilkan frekuensi tertentu pada sistem. Pengaturan pembagian beban dapat dilakukan dengan memberikan set point f_{ref} pada masing – masing generator. Konsep ini ditunjukkan pada gambar 2.11. Kurva 1 menunjukkan set point kurva droop ketika kondisi 1 yang menunjukkan nilai pembebanan pembangkit 1 dan pembangkit 2 masing – masing sebesar P_{G1} dan P_{G2} dengan frekuensi sinkron sebesar f_1 , kurva 2 menunjukkan set point kurva droop ketika kondisi 2 yang menunjukkan nilai pembebanan pembangkit 1 dan pembangkit 2 masing – masing sebesar $P_{G1'}$ dan $P_{G2'}$ dengan frekuensi sinkron sebesar f_2 .

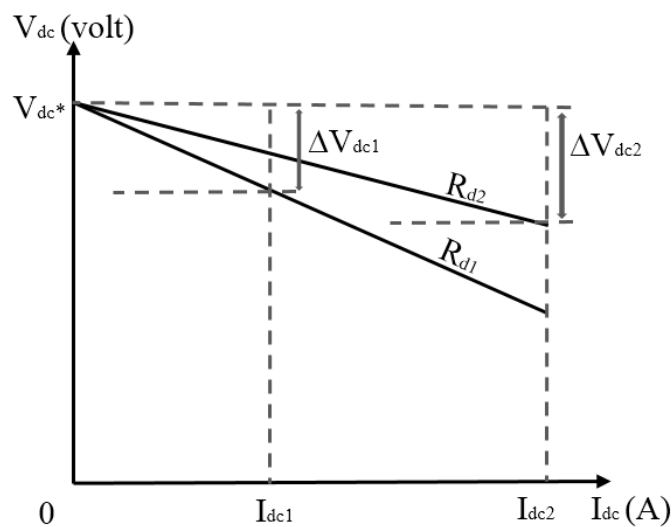
2.2.5 Konsep Droop Pada Sumber DC Paralel

Pada DC mikrogrid terdapat beberapa pembangkit energi terbarukan dengan tegangan keluaran DC. Masing - masing sumber DC memiliki karakteristik yang berbeda tergantung dari struktur dan prinsip kerjanya. Untuk analisis paralel sumber DC dapat menggunakan konsep superposisi. Untuk rangkaian pengganti 2 buah sumber DC yang terhubung paralel pada DC mikrogrid ditunjukkan pada gambar 2.12.



Gambar 2. 12 Rangkaian pengganti 2 sumber DC yang terhubung paralel

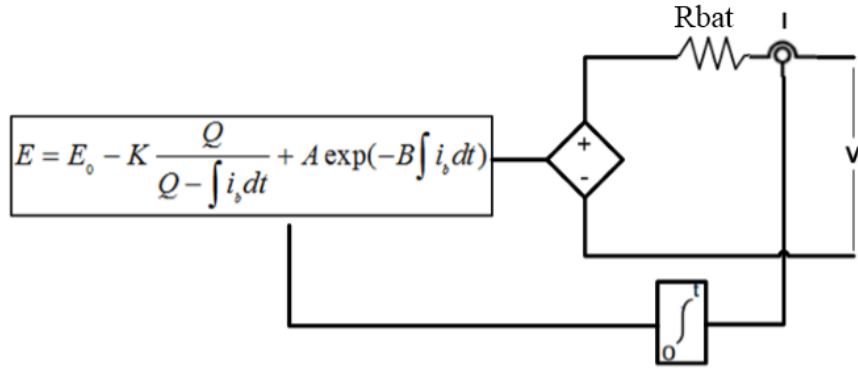
Karakteristik dari sumber DC ini direpresentasikan dengan kurva tegangan (V) – arus (I) yang disebut karakteristik droop. Perbedaan karakteristik droop pada masing masing sumber DC direpresentasikan dengan resistansi droop (R_d). Tahanan R_d ini akan mempengaruhi kemiringan kurva droop pada masing masing sumber DC seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.13.



Gambar 2. 13 Kurva droop pada 2 buah sumber DC dengan R_d berbeda.

2.2.6 Baterai

Baterai adalah komponen penyimpan muatan listrik yang mampu menyimpan muatan listrik sesuai kapasitasnya. Baterai dimodelkan dengan sebuah sumber tegangan terkontrol dan sebuah tahanan yang dihubungkan seri sebagaimana ditunjukkan pada gambar 2.14. Model ini mengacu pada model baterai generik non linier yang dimodelkan oleh Tremblay [14].



Gambar 2. 14 Model Trembly baterai generik non linier

Model baterai ini dibuat berdasarkan data pabrikannya utamanya data tegangan discharge dengan arus konstan.

$$E = E_0 - K \frac{Q}{Q - \int i_b dt} + A \exp(-B \int i_b dt) \quad (2.16)$$

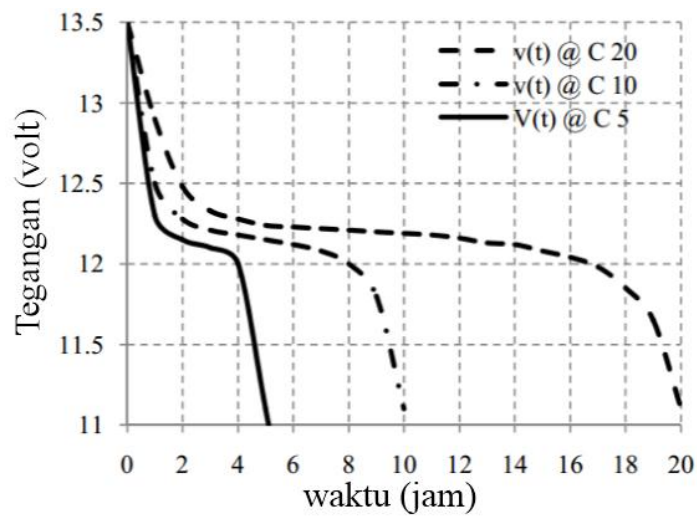
Dalam model baterai ini baterai direpresentasikan sumber tegangan terkontrol yang terhubung seri dengan resistansi dalam baterai. Sumber tegangan terkontrol ini dirumuskan seperti persamaan 2.16 yang dipengaruhi oleh beberapa faktor diantaranya : E dan E_0 merupakan tegangan tanpa beban dan tegangan konstan baterai, Q adalah kapasitas baterai, R_{bat} adalah tahanan dalam baterai, v dan i adalah tegangan terminal dan arus baterai. Data Q dan R_{bat} diperoleh dari data pabrikannya, E_0 diturunkan dari grafik discharge yang diberikan oleh pabrikannya.

$$A = E_{full} - E_{exp} \quad (2.17a)$$

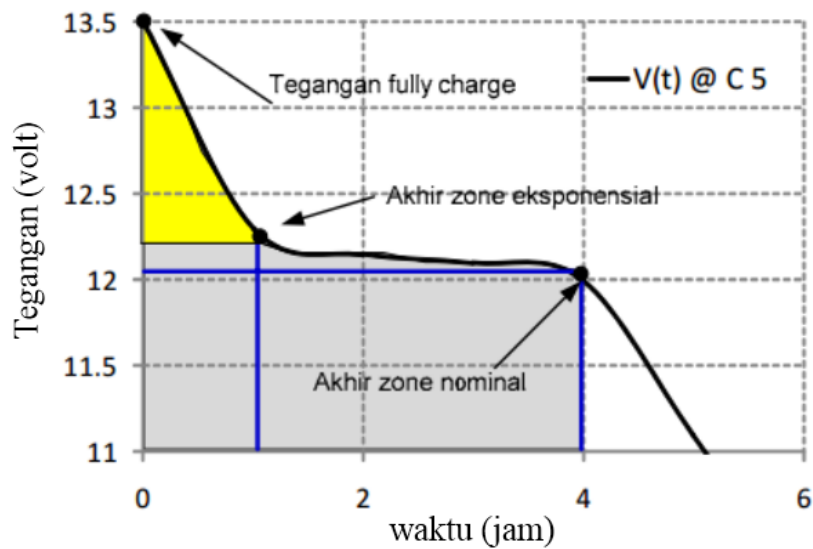
$$B = \frac{3}{Q_{exp}} \quad (2.17b)$$

$$K = \left[E_{full} - E_{nom} + A(\exp(-BQ_{nom}) - 1) \right] \frac{Q - Q_{nom}}{Q_{nom}} \quad (2.17c)$$

A adalah tegangan jatuh selama zona eksponensial, B adalah muatan baterai dalam zona eksponensial, K konstanta polarisasi, Q adalah kapasitas baterai, $\int i_b dt$ arus aktual pengisian baterai. Nilai A , B , K diturunkan dari grafik discharge baterai yang ditunjukkan pada gambar 2.15 dan gambar 2.16.



Gambar 2. 15 Data tegangan pada discharge dengan arus konstan [15]



Gambar 2. 16 Grafik tegangan discharge baterai [15]

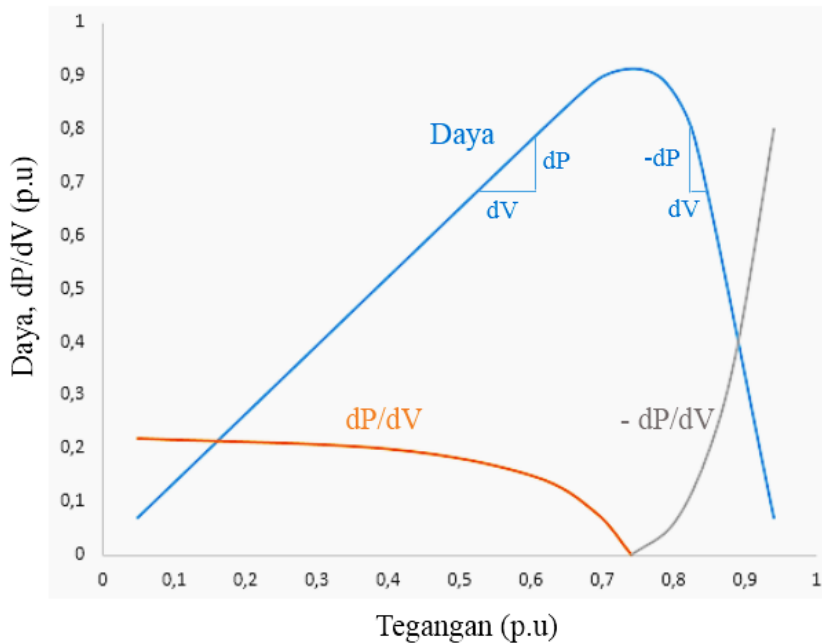
2.2.7 Kontrol MPPT Dengan Metode *Incremental Conductance*

Incremental Conductance (IC) adalah salah satu metode kontrol MPPT yang memiliki performa cukup baik dalam mengatasi permasalahan dalam kontrol MPPT seperti error steady state dan kecepatan konvergensinya. Metode ini memiliki performa yang lebih baik dibandingkan dengan metode *Perturb and Obserb* (PnO)

dilihat dari error steady state dan kecepatan konvergensinya. Konsep dari metode PnO adalah mengkondisikan titik operasi maksimum ketika selisih daya terukur (P_k) terhadap daya terukur sebelumnya (P_{k-1}) dan selisih tegangan terukur (V_k) terhadap tegangan terukur sebelumnya (V_{k-1}) bernilai positif atau negatif. Kemudian akan ditentukan untuk menaikkan nilai atau menurunkan nilai duty cycle. Konsep dari metode IC menggunakan turunan daya (dP) terhadap arus (I) atau tegangan (V). Daya maksimum akan tercapai bila (dP/dV) , dV dan dI bernilai nol. Algoritma IC dapat di tunjukkan secara grafik daya (P) vs tegangan (V) seperti pada gambar 2.17 [16]. Kondisi ini ditunjukkan pada persamaan 2.18 dan 2.19.

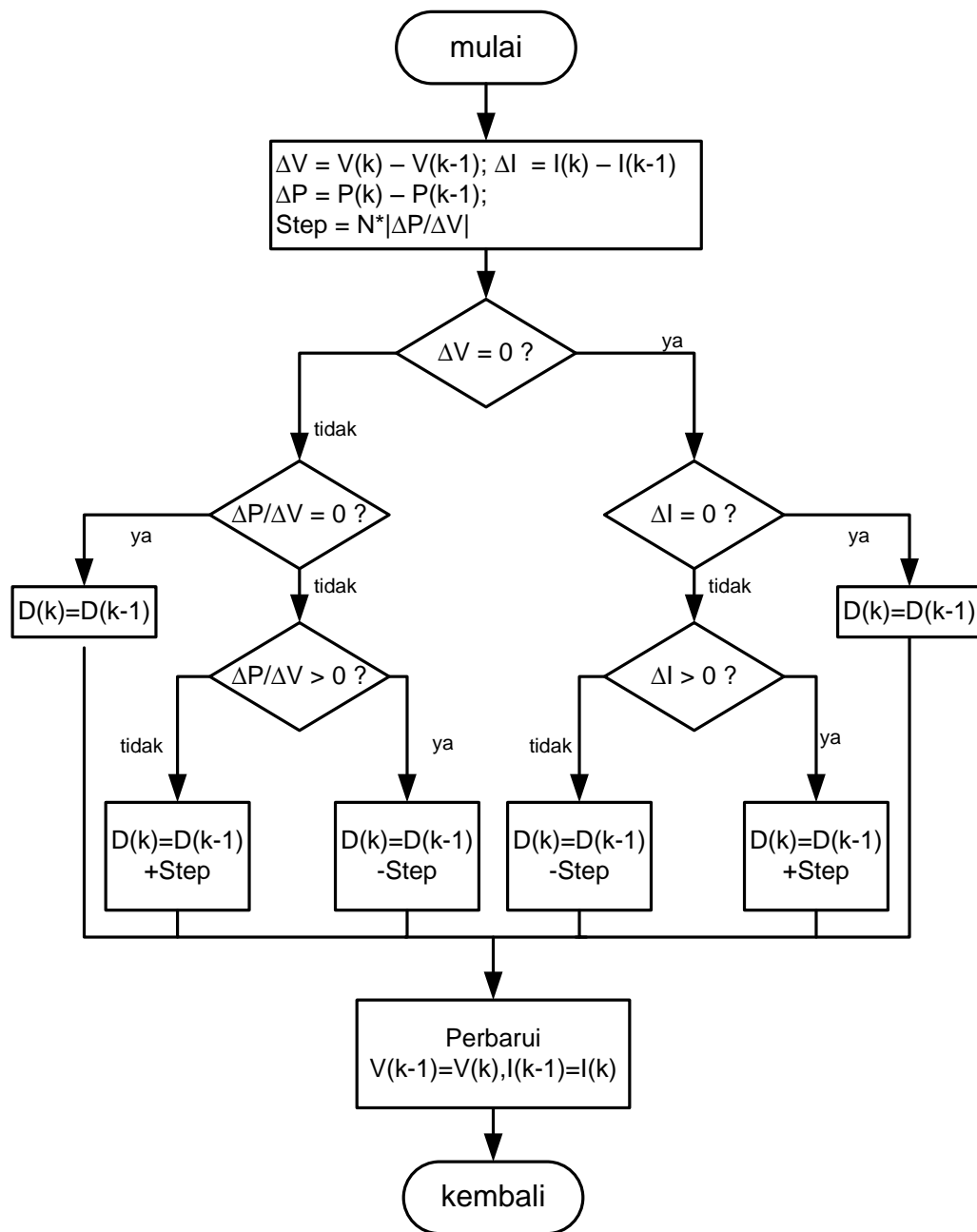
$$\frac{dP}{dV} = \frac{d(V \cdot I)}{dV} = I \cdot \frac{dV}{dV} + V \cdot \frac{dI}{dV} = I + V \cdot \frac{dI}{dV} \quad (2.18)$$

$$\frac{dP}{dI} = \frac{d(V \cdot I)}{dI} = I \cdot \frac{dV}{dI} + V \cdot \frac{dI}{dI} = I \cdot \frac{dV}{dI} + V \quad (2.19)$$



Gambar 2. 17 Grafik daya (P) vs tegangan (V) pada algoritma IC

Untuk flowchart konsep dari algoritma IC ditunjukkan pada gambar 2.18. Algoritma IC ini menaikkan dan menurunkan tegangan operasi pembangkit dengan parameter selisih daya terukur dengan nilai sebelumnya dan selisih tegangan terukur dengan nilai sebelumnya.

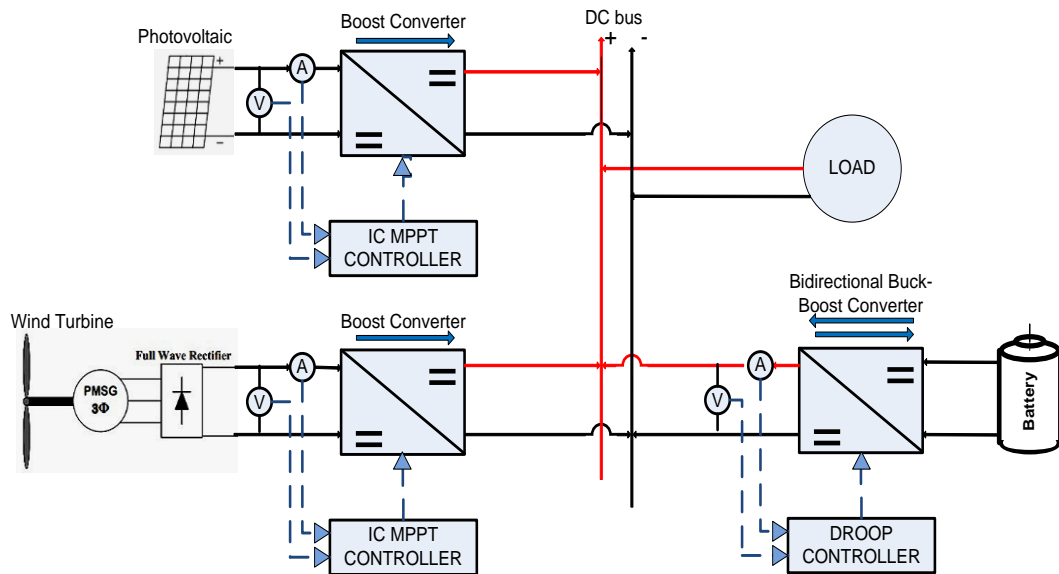


Gambar 2. 18 Flowchart algoritma *incremental conductance* (IC)[11]

BAB 3

PERANCANGAN DAN SIMULASI SISTEM

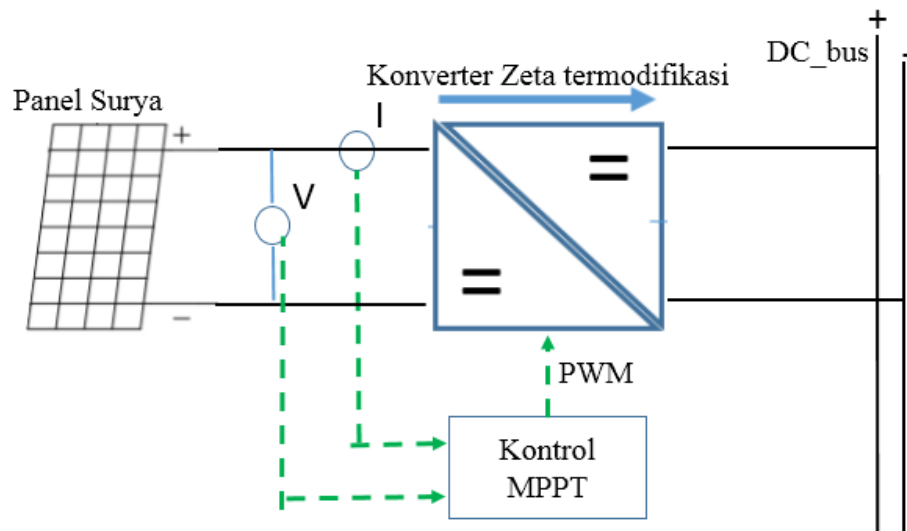
Pada bab ini akan dibahas perancangan dan pemodelan sistem hibrid PLTS, PLTB dan BMS beserta sistem kontrol pada masing – masing bagian. Konfigurasi sistem hibrid yang diajukan pada penelitian ini ditunjukkan pada gambar 3.1.



Gambar 3. 1 Sistem hibrid yang diajukan

3.1 Perancangan sistem PLTS

Komponen sistem photovoltaik terdiri dari panel surya dan konverter penaik tegangan. Panel surya dihubungkan pada Bus DC melalui perantara konverter penaik tegangan dengan sistem kontrol MPPT untuk mendapatkan daya maksimal yang dapat dibangkitkan dari panel surya. Sistem photovoltaik yang diajukan ditunjukkan pada gambar 3.2.



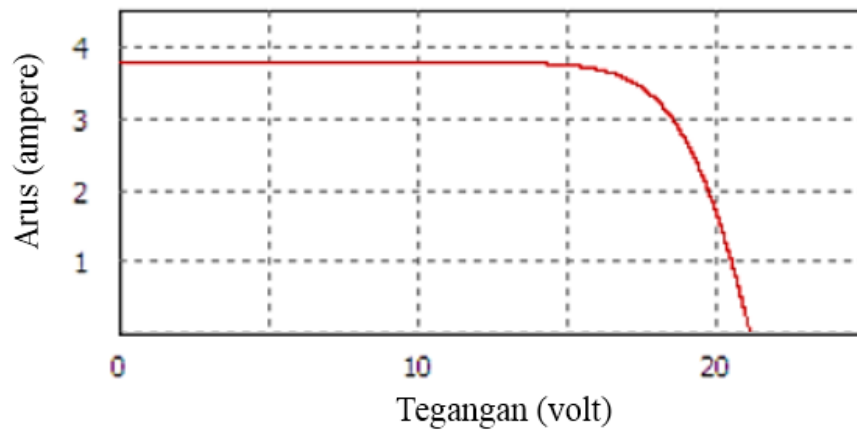
Gambar 3. 2 Konfigurasi sistem panel surya

3.1.1 Panel Surya

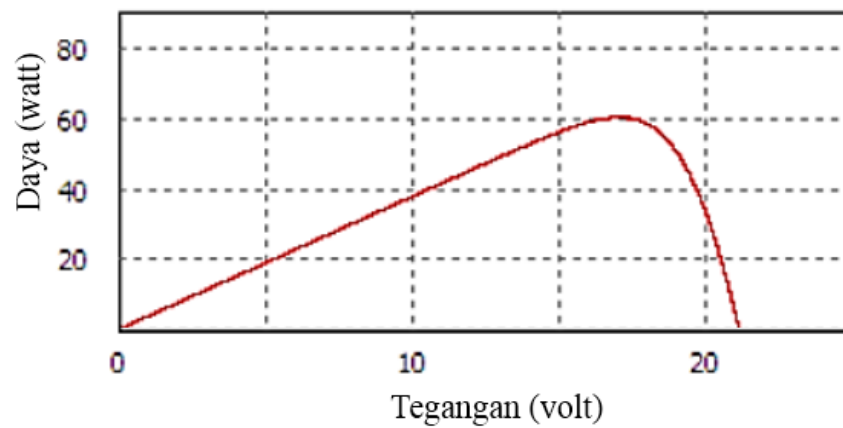
Spesifikasi panel surya yang akan digunakan ditunjukkan pada tabel 3.1. Konfigurasi panel surya yang digunakan terdiri dari 4 modul PV yang dihubungkan secara seri. Untuk kurva karakteristik PV ditunjukkan pada gambar 3.3 dan gambar 3.4.

Tabel 3. 1 Spesifikasi panel surya [17]

Parameter	Nilai
P_{rated}	60 wp
V_{OC}	21,1 Volt
V_{MP}	17,1 Volt
I_{SC}	3,8 A
I_{MP}	3,5 A
T	25°
n-Array	4



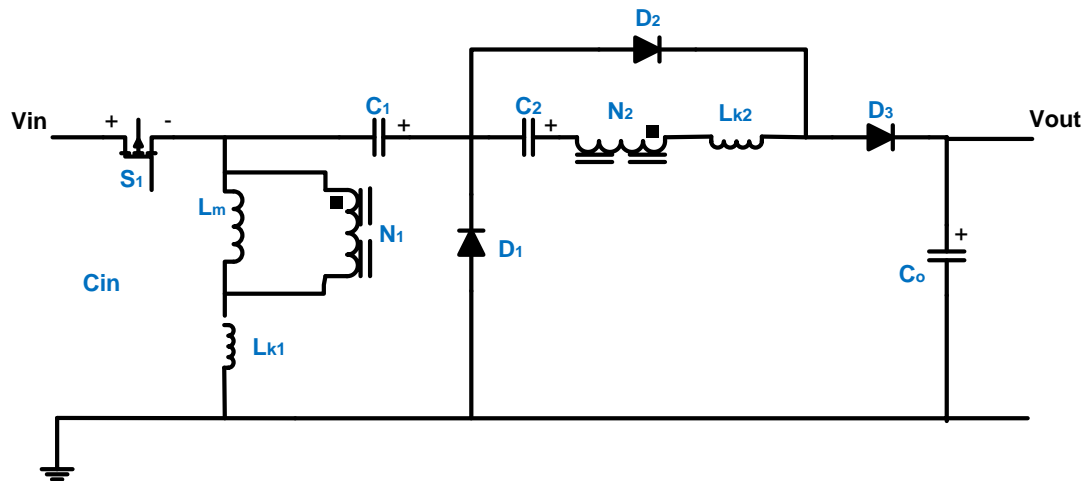
Gambar 3. 3 Kurva karakteristik I-V



Gambar 3. 4 Kurva karakteristik P-V

3.1.2 Perancangan Konverter Zeta Termodifikasi

Konverter penaik tegangan yang akan digunakan pada sistem ini adalah konverter zeta dengan modifikasi induktor kopel dan kapasitor pengali [18]. Rangkaian dari konverter ini ditunjukkan pada gambar 3.5 dan spesifikasi dari konverter ini ditunjukkan pada tabel 3.2.



Gambar 3. 5 Rangkaian konverter zeta dengan induktor kopel dan kapasitor

Tabel 3. 2 Spesifikasi konverter DC-DC PLTS

Parameter	Nilai
P_{rated}	250 Watt
V_{in-min}	30 Volt
V_{in-max}	42 Volt
V_{out}	311 Volt
F_{Sw}	20 kHz
n	3
$\frac{\Delta I_{L-pp}}{I_{L-avg}}$	10 %
$\frac{\Delta V_{o-pp}}{V_{o-avg}}$	0,01 %

- Desain konverter zeta dengan induktor kopel dan kapasitor
 - Duty cycle maksimum

$$D = \frac{V_{out} - V_{in}(1+n)}{V_{out}} \quad (3.1)$$

$$D = \frac{320 - 30(1 + 3)}{320} = 0,625$$

- Penentuan Tahanan Beban

$$R_{load} = \frac{V_{out}^2}{P} = \frac{320^2}{250} = 409,6 \text{ Ohm}$$

- Penentuan Nilai Induktor

$$L_m = \frac{R_B}{F_{sw}} \times \frac{D^3 - 2D^2 + D}{2n^2 + 4n + 2} \quad (3.2)$$

- Penentuan Iout ketika mode *boundary*

$$I_{Lm} = I_{in} = \frac{P}{V_{in}} = \frac{250}{30} = 8,333$$

$$I_{outB} = \frac{V_{in} \times \Delta I_{Lm}}{2 \times V_{out}} = \frac{30 \times 0,1 \times 8,333}{2 \times 320} = 0,039$$

- Penentuan Rout (tahanan beban) ketika terjadi mode *boundary*

$$R_{oB} = \frac{V_{out}}{I_{outB}} = \frac{320}{0,039} = 8205 \text{ Ohm}$$

- Sehingga nilai induktor dapat ditentukan dari persamaan 3.2 :

$$L_m = \frac{10240}{20k} \times \frac{0,625^3 - 2(0,625)^2 + 0,625}{2(3)^2 + 4(3) + 2}$$

$$F_{sw} = 20\text{kHz}, n = 3 \rightarrow L_m = 1,126 \text{ mH}$$

- Penentuan nilai kapasitor

$$V_{C1} = \frac{D}{1-D} V_{in} = \frac{0,625}{1-0,625} \times 30 = 50 \text{ V}$$

$$V_{C2} = \frac{nD}{1-D} V_{in} = \frac{3 \times 0,625}{1-0,625} \times 30 = 150 \text{ V}$$

$$C_1 \geq \frac{2 \times P_{max}}{V_{C1}^2 \times f_s} \geq \frac{2 \times 250}{50^2 \times 20000} \geq 10 \text{ uF}$$

$$C_2 \geq \frac{2 \times P_{max}}{V_{C2}^2 \times F_{sw}} \geq \frac{2 \times 250}{150^2 \times 20000} \geq 1,1 \text{ uf}$$

Diharapkan ripple tegangan keluaran sebesar 0,01% :

$$\frac{\Delta V_{out}}{V_{out}} = 0,01\% = 0,0001 \times 320 = 0,032 \text{ V}$$

$$\Delta Q_{on} = C_0 \times \Delta V_{cpp} ; \quad \Delta Q_{off} = I_o \times T_{on}$$

$$\Delta Q_{on} = \Delta Q_{off}$$

$$C_0 \times \Delta V_{cpp} = I_o \times T_{on}$$

$$\Delta V_{cpp} = \frac{I_o \times D \times T_s}{C_0}$$

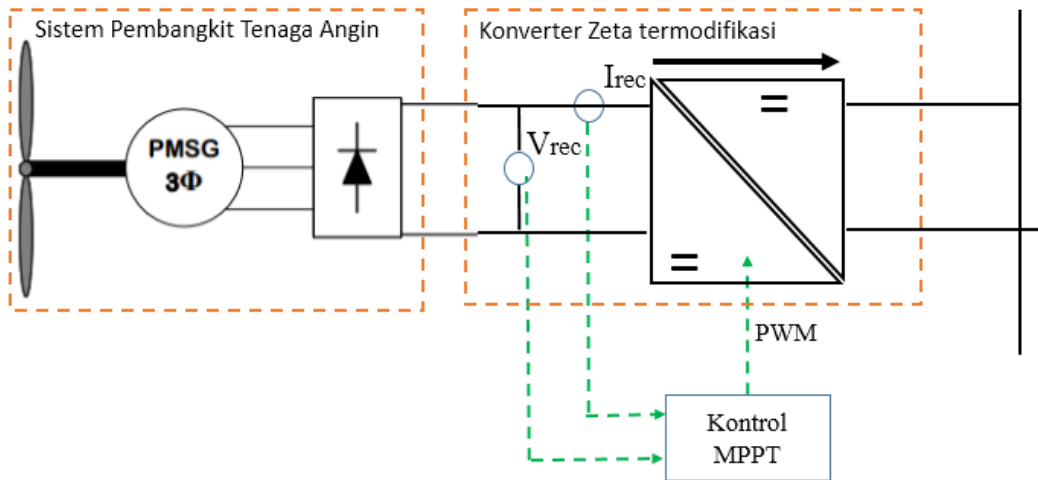
$$\frac{\Delta V_{cpp}}{V_o} = \frac{D}{R \times C_0 \times F_{sw}}$$

$$0,001 = \frac{D}{R \times C_0 \times F_{sw}}$$

$$C_0 = \frac{0,625}{0,001 \times 512 \times 20000} = 61,35 \text{ uF}$$

3.2 Perancangan Sistem Pembangkit Tenaga Angin

Sistem Pembangkit Tenaga Angin (PLTB) dihubungkan pada bus DC melalui perantara konverter penaik tegangan dengan sistem kontrol MPPT untuk mendapatkan daya maksimal yang dapat dibangkitkan dari sistem turbin angin. Sistem pembangkit tenaga angin yang diajukan ditunjukkan pada gambar 3.6.



Gambar 3. 6 Sistem pembangkit listrik tenaga angin

3.2.1 Sistem Pembangkit Tenaga Angin

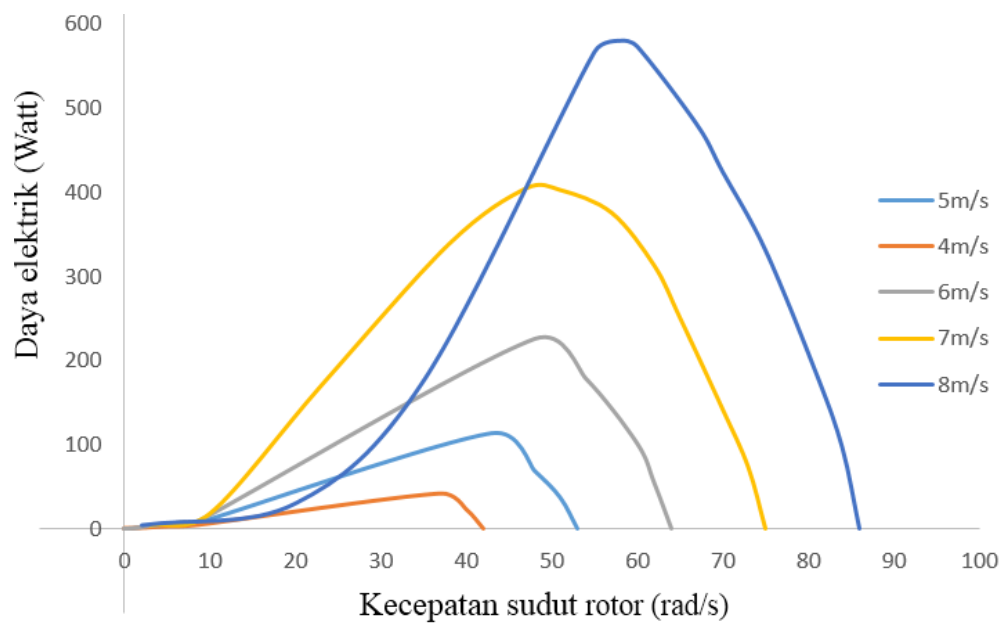
Sistem pembangkit tenaga angin menggunakan komponen PMSG dan penyearah 3 fasa gelombang penuh. Spesifikasi turbin angin yang digunakan ditunjukkan pada tabel 3.3, sementara spesifikasi PMSG ditunjukkan pada tabel 3.4.

Tabel 3. 3 Spesifikasi sistem turbin angin

Parameter	Nilai				
P_{mek_turbin}	45 Watt	127 Watt	257 Watt	446 Watt	635 Watt
$P_{elektrik}$	42 Watt	114 Watt	238 Watt	405 Watt	580 Watt
Kecepatan angin	4 m/s	5 m/s	6 m/s	7 m/s	8 m/s
Kecepatan rotasi	353 rpm	410 rpm	458 rpm	450 rpm	554 rpm

Tabel 3. 4 Spesifikasi PMSG [17]

Parameter	Nilai
R_s (resistansi stator)	1,004 Ohm
L_d (induktansi d-axis)	0,0082 H
$V_{pk}/krpm$	190,86 rpm
Jumlah kutup	18
Momen inersia	0,01197 kg/m ²
Konstanta waktu shaft	10 s



Gambar 3. 7 Kurva karakteristik daya elektrik vs kecepatan sudut rotor

Karakteristik dari sistem PLTB yang digunakan ditunjukkan pada gambar 3.7. Spesifikasi konverter dihitung dari daya keluaran PMSG dimana dipengaruhi oleh efisiensi gearbox, dan efisiensi PMSG dimana efisiensi gearbox diasumsikan 100%.

Tabel 3. 5 Spesifikasi konverter DC-DC PLTB

Parameter	Nilai
P_{rated}	600 Watt
V_{in-min}	30 Volt
V_{in-max}	60 Volt
V_{out}	320 Volt
F_{Sw}	20 kHz
n	2
$\frac{\Delta I_{L-pp}}{I_{L-avg}}$	10 %
$\frac{\Delta V_{o-pp}}{V_{o-avg}}$	0,01 %

Konverter zeta dengan kapasitor dan induktor terkopel didesain sesuai spesifikasi yang ditunjukkan pada tabel 3.5 untuk sistem PV dan turbin angin dengan spesifikasi yang sama.

3.2.2 Perancangan Konverter Zeta dengan induktor kopel dan kapasitor

- Duty cycle maksimum

$$D = \frac{V_{out} - V_{in}(1 + n)}{V_{out}} = \frac{320 - 30(1 + 2)}{320} = 0,71$$

- Penentuan tahanan beban

$$R_{load} = \frac{V_{out}^2}{P} = \frac{320^2}{600} = 170 \text{ Ohm}$$

- Penentuan nilai induktor

$$L_m = \frac{R_B}{F_{sw}} \times \frac{D^3 - 2D^2 + D}{2n^2 + 4n + 2}$$

- Penentuan Iout ketika mode *boundary*

$$I_{Lm} = I_{in} = \frac{P}{V_{in}} = \frac{600}{30} = 20 \text{ A}$$

$$I_{outB} = \frac{V_{in} \times \Delta I_{Lm}}{2 \times V_{out}} = \frac{30 \times 0,1 \times 20}{2 \times 320} = 0,09375 \text{ A}$$

- Penentuan Rout (tahanan beban) ketika terjadi mode *boundary*

$$R_{oB} = \frac{V_{out}}{I_{outB}} = \frac{320}{0,09375} = 3413,3 \text{ Ohm}$$

- Sehingga nilai induktor dapat ditentukan :

$$L_m = \frac{R_B}{F_{sw}} \times \frac{D^3 - 2D^2 + D}{2n^2 + 4n + 2} = \frac{3413}{20k} \times \frac{0,71^3 - 2(0,71)^2 + 0,71}{2(2)^2 + 4(2) + 2}$$

$$F_{sw} = 20k, n = 2 \rightarrow L_m = 644 \text{ uH}$$

- Penentuan Nilai Kapasitor

$$V_{C1} = \frac{D}{1 - D} V_{in} = \frac{0,71}{1 - 0,71} \times 30 = 73,4 \text{ V}$$

$$V_{C2} = \frac{n D}{1 - D} V_{in} = \frac{2 \times 0,71}{1 - 0,71} \times 30 = 146 \text{ V}$$

$$C_1 \geq \frac{2 \times P_{max}}{V_{C1}^2 \times f_s} \geq \frac{2 \times 600}{73,4^2 \times 20000} \geq 11,1 \text{ uF}$$

$$C_2 \geq \frac{2 \times P_{max}}{V_{C2}^2 \times F_{sw}} \geq \frac{2 \times 600}{146^2 \times 20000} \geq 2,8 \mu F$$

Diharapkan ripple tegangan keluaran sebesar 0,01% :

$$\frac{\Delta V_{out}}{V_{out}} = 0,1\% = 0,001 \times 320 = 0,32 V$$

$$\Delta Q_{on} = C_0 \times \Delta V_{cpp} ; \quad \Delta Q_{off} = I_o \times T_{on}$$

$$\Delta Q_{on} = \Delta Q_{off}$$

$$C_0 \times \Delta V_{cpp} = I_o \times T_{on}$$

$$\Delta V_{cpp} = \frac{I_o \times D \times T_s}{C_0}$$

$$\frac{\Delta V_{cpp}}{V_o} = \frac{D}{R \times C_0 \times F_{sw}}$$

$$0,001 = \frac{D}{R \times C_0 \times F_{sw}}$$

$$C_0 = \frac{0,71}{0,001 \times 170 \times 20000} = 208 \mu F$$

3.3 Sistem Manajemen Baterai

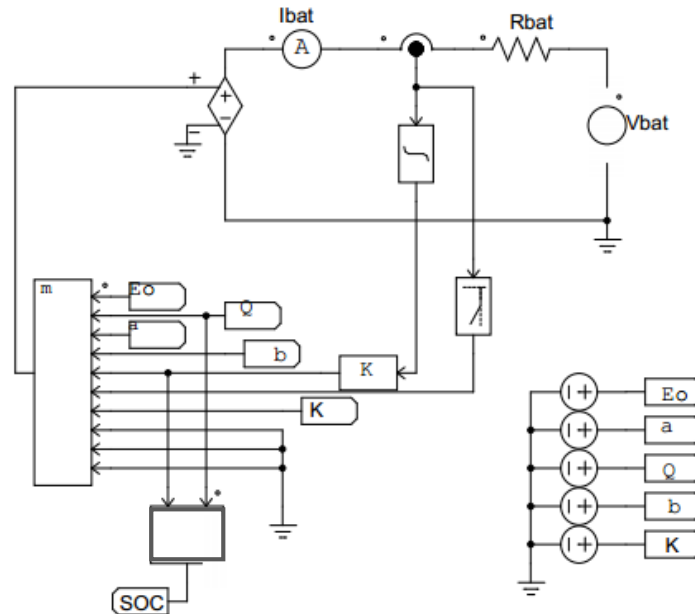
Pada perencanaan sistem manajemen baterai ini akan dilakukan pemodelan baterai dan perancangan konverter bidirectional buck - boost dengan sistem kontrol droop.

Tabel 3. 6 Data charge discharge baterai SGL100 [12]

Parameter	Nilai
E_{full}	13,5 Volt
E_{exp}	12,2 Volt
Q_{nom}	22 Ah
Q_{exp}	88 Ah
Q	110 Ah
A	1,3 Volt
B	0,142857/Ah
K	0,061907 Volt
R	3,4 mΩ

1. Pemodelan baterai

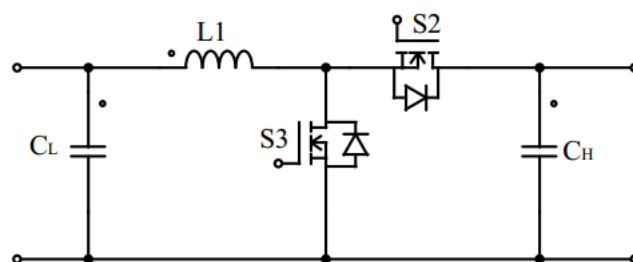
Baterai yang dimodelkan memiliki spesifikasi seperti yang ditunjukkan pada tabel 3.6. Untuk mendapatkan tegangan yang tinggi (120 Volt) maka baterai dihubungkan secara seri sebanyak 10 buah. Berikut pemodelan baterai yang ditunjukkan pada gambar 3.8.



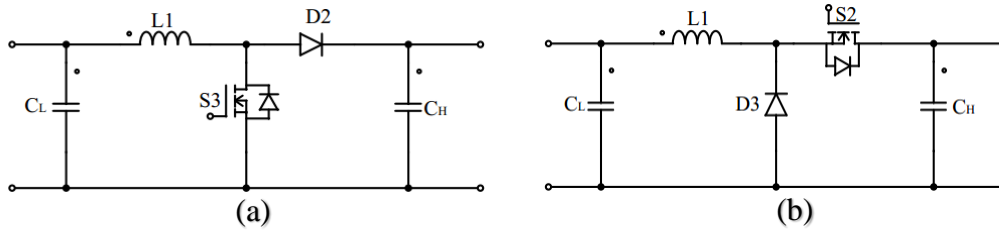
Gambar 3. 8 Pemodelan baterai pada PSIM

3.3.1 Perancangan konverter bidirectional.

Rangkaian bidirectional buck-boost konverter ditunjukkan pada gambar 3.9. Perancangan konverter bidirectional dilakukan pada 2 mode yaitu mode operasi boost dan mode operasi buck. Rangkaian pengganti saat mode boost ditunjukkan pada gambar 3.10a dan mode buck ditunjukkan pada gambar 3.10b.



Gambar 3. 9 Topologi rangkaian bidirectional buck-boost konverter



Gambar 3. 10 Rangkaian konverter bidirectional, a)mode boost ; b)mode buck

Tabel 3. 7 Spesifikasi bidirectional konverter mode boost

Mode	Boost
P-rated	500 W
Vin	100 V
Vout	311 V
Fsw	20 kHz
$\frac{\Delta I_{L-pp}}{I_{L-avg}}$	10 %
$\frac{\Delta V_{o-pp}}{V_{o-avg}}$	0.1 %

- Duty cycle

$$D = 1 - \frac{V_{in}}{V_o} = 1 - \frac{100}{311} = 0,678$$

- Tahanan beban

$$R = \frac{V_o^2}{P} = \frac{311^2}{500} = 193,442\Omega$$

- Induktor

$$I_{L-avg} = \frac{V_{in}}{(1-D)^2 R} = \frac{100}{(1-0,678)^2 \times 193,44} = 4,985A$$

$$\Delta I_L = 10\% = 0,1 \times 4,985 = 0,4985$$

$$L = \frac{V_{in} D}{\Delta I_L f_{sw}} = \frac{100 \times 0,678}{0,4985 \times 20000} = 6,8mH$$

- Kapasitor

$$C_H = \frac{D}{R \left(\frac{\Delta V_o}{V_o} \right) f_{sw}} = \frac{0,678}{193,442 \times (0,001) \times 20000} = 175 \mu F$$

Tabel 3. 8 Spesifikasi bidirectional konverter mode buck

Mode	Buck
Daya (P-rated)	500 W
Vin	311 V
Vout	100 V
Fsw	20 kHz
$\frac{\Delta I_{L-pp}}{I_{L-avg}}$	10 %
$\frac{\Delta V_{o-pp}}{V_{o-avg}}$	0.01 %

- Duty cycle

$$D = \frac{V_o}{V_{in}} = \frac{100}{311} = 0,321$$

- Tahanan beban

$$R = \frac{V_o^2}{P} = \frac{100^2}{500} = 20 \Omega$$

- Induktor

$$I_{L-avg} = \frac{V_{out}}{R} = \frac{100}{20} = 5 A$$

$$\Delta I_L = 10\% = 0,1 \times 5 = 0,5$$

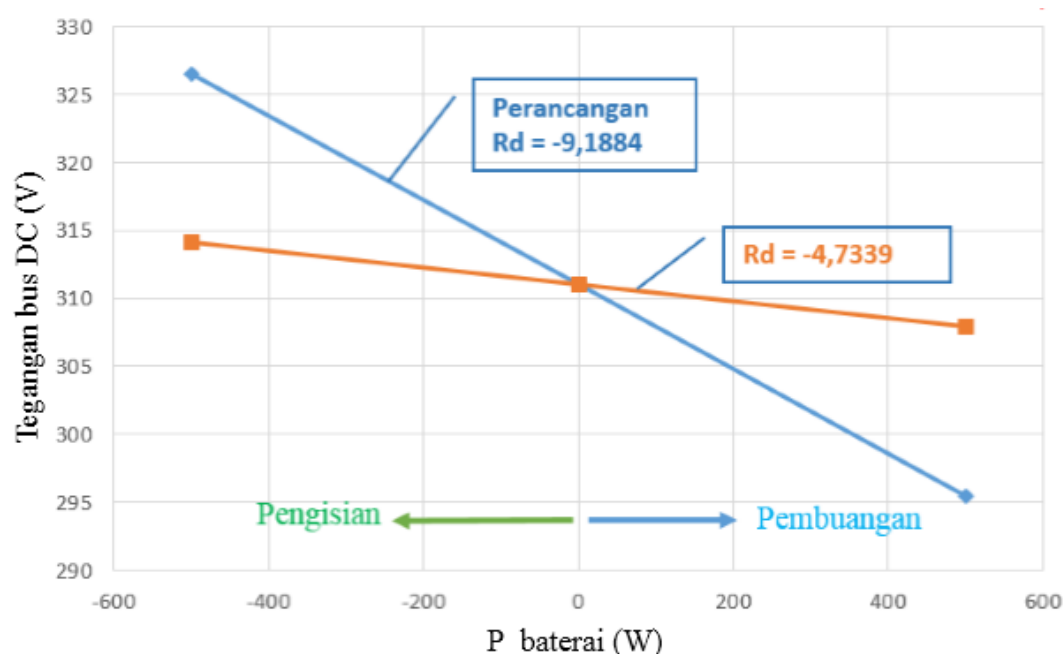
$$L = \frac{V_o(1-D)}{\Delta I_L \cdot f_{sw}} = \frac{100 \times (1-0,321)}{0,5 \times 20000} = 6,79 mF$$

- Kapasitor

$$C_L = \frac{D}{8 \times L \times \left(\frac{\Delta V_o}{V_o} \right) \cdot f_{sw}^2} = \frac{0,321}{8 \times (0,00679) \times (0,0001) \times 20000^2} = 147,7 \mu F$$

3.4 Perancangan Regulasi Tegangan Droop

Regulasi tegangan droop ini dirancang untuk meregulasi daya pada sistem dan menjaga tegangan Bus DC tetap konstan dengan konsep droop. Konsep droop dirancang dengan range tegangan Bus DC adalah 295 Volt s/d 326 Volt dan range daya -500 Watt s/d 500 Watt. Nilai range daya tersebut ditentukan ketika kondisi tanpa beban sementara total daya PLTS dan PLTB bernilai maksimum. Daya PLTS nominal adalah 240 W, Daya PLTB pada kecepatan angin 6 m/s sebesar 238 W dan 7 m/s sebesar 400 W. Sehingga dipilih total daya PLTS dan PLTB sebesar 478 W. Bila terjadi kecepatan angin yang melebihi nominal maka range daya charging harus diperbesar untuk menjaga tegangan tetap dalam regulasi yang aman.



Gambar 3. 11 Rancangan regulasi tegangan droop

Tabel 3. 9 Perancangan regulasi tegangan bus DC

Regulasi tegangan (%)	ΔV (Volt)	P (Watt)	V (Volt)	I (Ampere)	R_d
$\Delta V=10\%$	31,1	-500	326,55	-1,5312	-9,1885
		0	311	0,0000	
		500	295,45	1,6923	
$\Delta V=2\%$	6,22	-500	314,11	-1,5918	-4,7340
		0	311	0,0000	
		500	307,89	1,6240	

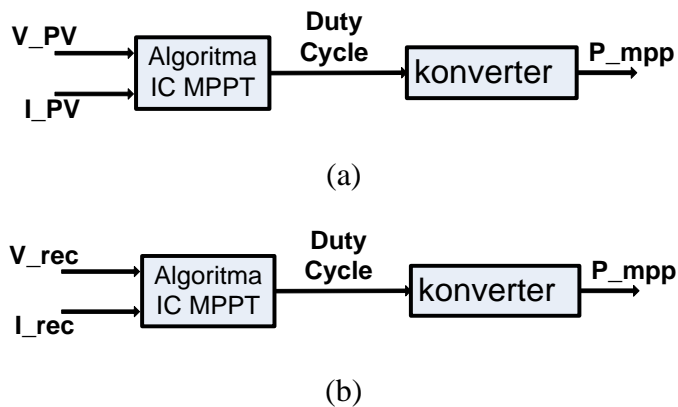
Range daya negatif (-) menunjukkan Baterai dalam kondisi *charging*, sementara range daya positif (+) menunjukkan baterai dalam kondisi *discharging*. Dengan nilai R_d yang kecil maka fluktuasi tegangan Bus DC akan kecil. Untuk rancangan regulasi tegangan droop ditunjukkan pada Gambar 3.11. Nilai R_d dicari dengan rumus persamaan slope ($\Delta V/\Delta I$). Perhitungan nilai R_d ditunjukkan sebagai berikut :

$$R_d = \Delta V/\Delta I = (295,45-311)/(1,692) = -9,1884$$

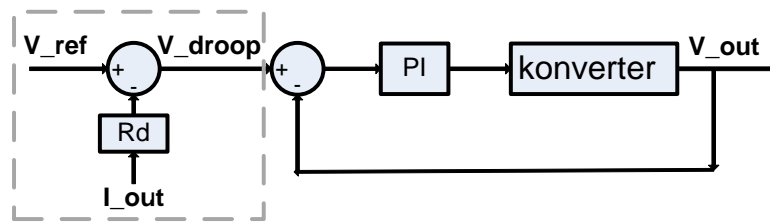
Perancangan regulasi tegangan bus DC ditunjukkan pada tabel 3.9, diagram kontrol MPPT pada PV dan PLTB serta diagram kontrol droop pada BMS ditunjukkan pada gambar 3.12 dan 3.13. Diagram kontrol ini termasuk bagian dari gambar 3.1. Rumusan kontrol droop ditunjukkan pada persamaan 3.1.

$$V_{\text{droop}} = V_{\text{ref}} - I_{\text{out}} R_d \quad (3.1)$$

Persamaan 3.1 ini mengacu pada gambar 3.13 yang merupakan implementasi diagram kontrol droop. V_{droop} menunjukan nilai set point pada kontrol tegangan konstan. Nilai dari set point ini akan berubah sesuai dengan regulasi yang terdapat pada perancangan kurva droop pada gambar 3.13, V_{ref} menunjukkan nilai set point kontrol droop yang merupakan nilai tengah dari regulasi tegangan yang telah dirancang yaitu sebesar 311 Volt, I_{out} merupakan arus keluaran konverter bidirectional buck – boost saat mode boost dan nilai R_d merupakan nilai slope ($\Delta V/\Delta P$) yang juga menentukan kemiringan dari kurva droop yang telah dirancang.



Gambar 3. 12 Diagram kontrol pada a) konverter PLTS; b) konverter PLTB



Gambar 3. 13 Diagram kontrol konverter buck–boost bidirectional pada BMS

3.5 Penentuan konstanta PI dengan metode Ziegler Nicols.

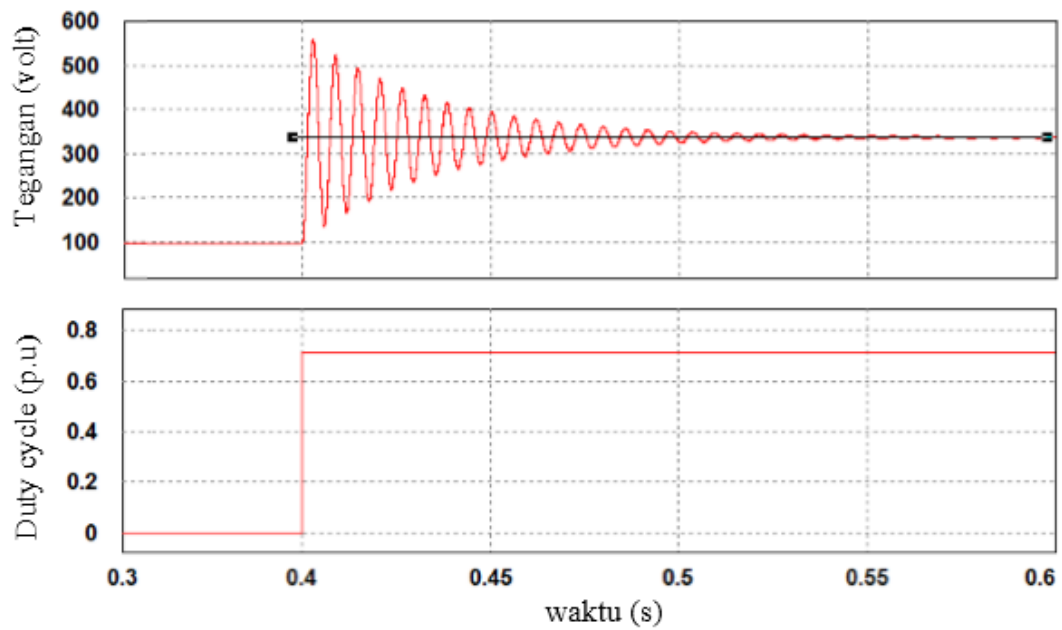
Penentuan konstanta gain proporsional K_p dan konstanta waktu kontrol integral T_i sangat penting dalam perancangan sistem kontrol. Pada tesis ini penentuan nilai K_p dan T_i dilakukan dengan menggunakan metode Ziegler Nicols.

1. Penentuan konstanta K_p dan T_i dengan metode Ziegler Nicols metode 1.

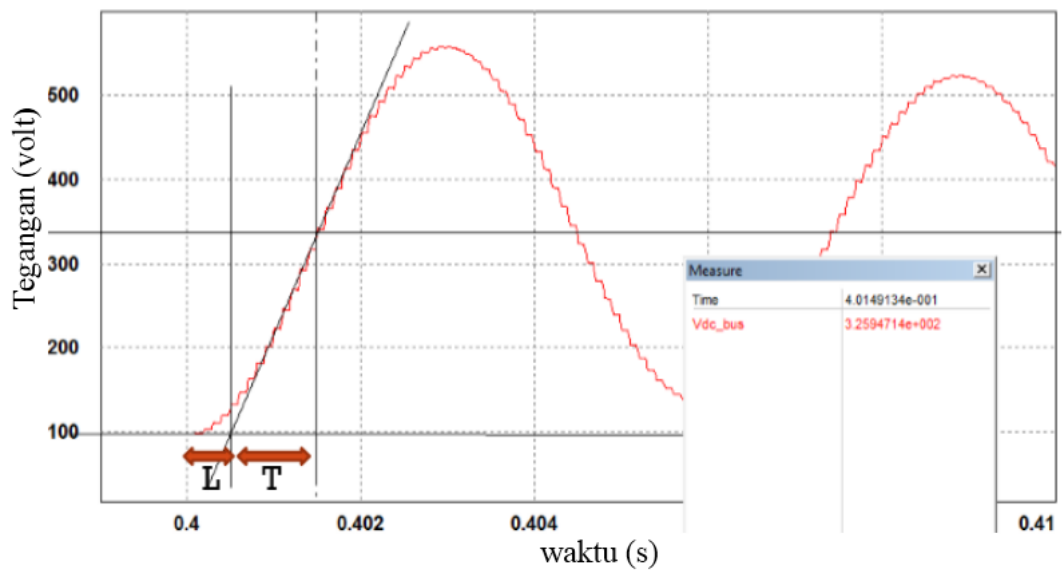
Penentuan konstanta K_p dan T_i pada metode Ziegler Nicols metode 1 dilakukan dengan melihat respon perubahan tegangan keluaran konverter bidirectional ketika terjadi perubahan duty cycle dari nilai minimum ke maksimum. Respon ini ditunjukkan pada gambar 3.14.

Tabel 3. 10 Penentuan kontanta parameter Ziegler Nicols

Tipe	K_p	T_i	T_d
P	T/L	∞	0
PI	0,9 T/L	T/L	0
PID	1,2 T/L	2L	0,5L



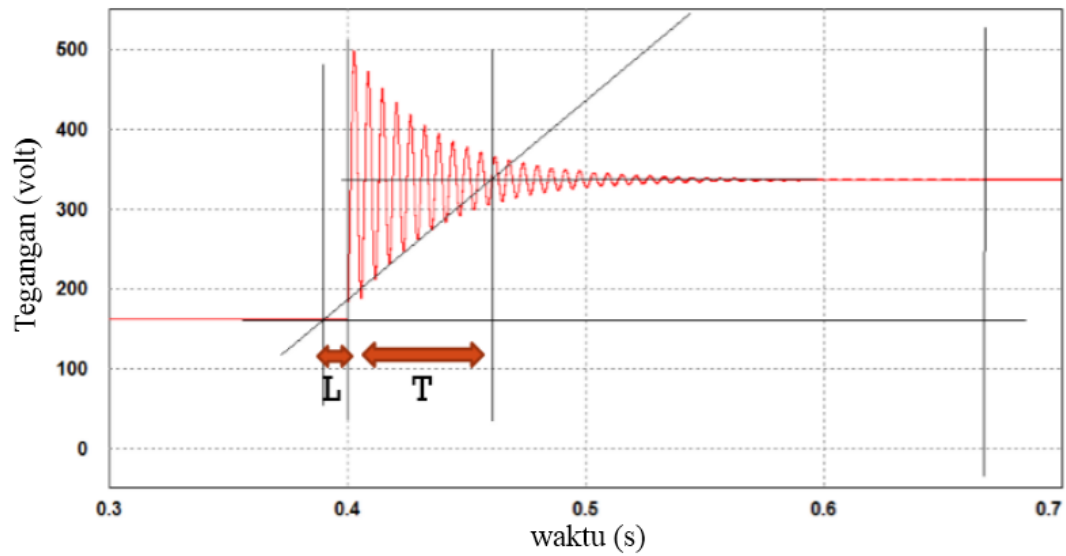
Gambar 3. 14 Respon tegangan bus DC saat terjadi perubahan duty cycle



Gambar 3. 15 Penentuan batas – batas L dan T respon tegangan pada metode Ziegler Nicols metode 1

Respon tegangan bus DC saat terjadi perubahan duty cycle ditunjukkan pada gambar 3.14 dan penentuan batas – batas L dan T respon tegangan pada metode Ziegler Nicols metode 1 ditunjukkan pada gambar 3.15. Didapatkan nilai $L = 0,000511$ dan $T = 0,00098$. Sehingga didapatkan K_p sebesar 1,59 dan T_i sebesar 1,76

Penentuan konstanta K_p dan T_i dengan metode ziegler nicols juga dilakukan dengan cara seperti ditunjukkan pada gambar 3.16. Didapatkan nilai $L = 0,010396$ dan $T = 0,071782$. Sehingga didapatkan K_p sebesar 6,24 dan T_i sebesar 6,9047.



Gambar 3. 16 Penentuan batas – batas L dan T respon tegangan pada metode Ziegler Nicols

BAB 4

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bab ini akan dibahas hasil simulasi sistem pembangkit hibrid PLTS, PLTB dan baterai terkait respon dari kontrol MPPT, efisiensi tracking MPPT dan respon dari kontrol droop.

4.1 Analisis Sistem Kontrol MPPT pada PLTS

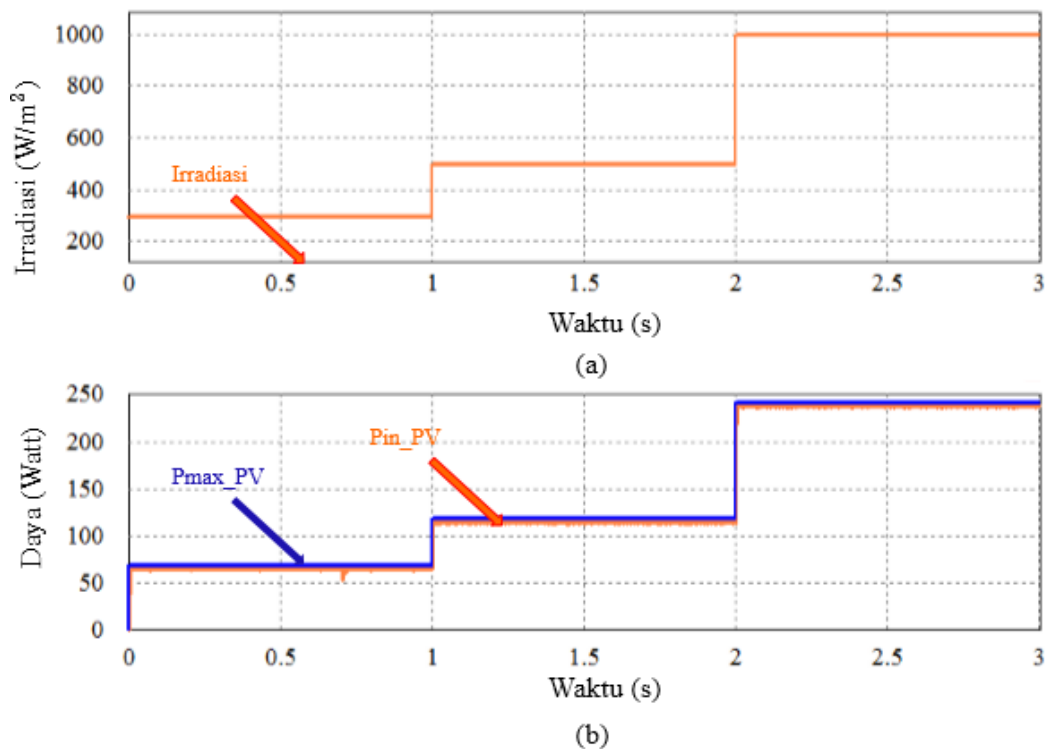
Pada sistem hibrid yang diajukan ini, sistem PLTS dioperasikan pada kondisi daya maksimum yang mampu dihasilkan oleh panel surya agar didapatkan efisiensi energi yang baik. Daya keluaran panel surya dikontrol dengan sistem kontrol MPPT dengan masukan berupa tegangan dan arus keluaran panel surya (V_{pv} dan I_{pv}) dan keluaran berupa duty cycle untuk mentrigger saklar boost konverter. V_{pv} dan I_{pv} akan diukur dan dikomputasi oleh kontroler dengan algoritma kontrol incremental conductance untuk menghasilkan duty cycle hingga mencapai titik daya maksimum panel surya.

Algoritma incremental conductance yang dipakai adalah variabel step, dikarenakan memiliki fleksibilitas yang baik sehingga menghasilkan efisiensi yang baik. Algoritma incremental conductance ini membandingkan slope daya dan tegangan yang terukur dengan daya dan tegangan sebelumnya ($\Delta P/\Delta V$). Bila slope $\Delta P/\Delta V$ telah mencapai nol maka operasi daya keluaran panel surya berada pada kondisi maksimum. Selain slope daya dan tegangan, titik maksimum daya panel surya dapat dicapai ketika ΔV bernilai nol dan ΔI bernilai nol. Untuk dapat melihat performa dari kontrol MPPT dengan algoritma incremental conductance akan ditampilkan beberapa respon aliran daya PLTS.

4.1.1 Respon Perubahan Daya Akibat Perubahan Irradiasi Sinar Matahari

Perubahan irradiasi sinar matahari akan menyebabkan titik operasi daya maksimum panel surya berubah. Kontrol MPPT diharapkan dapat merespon dengan cepat perubahan titik operasi daya maksimum pada panel surya. Respon perubahan daya tersebut ditunjukkan pada gambar 4.1. Dari gambar 4.1 dapat

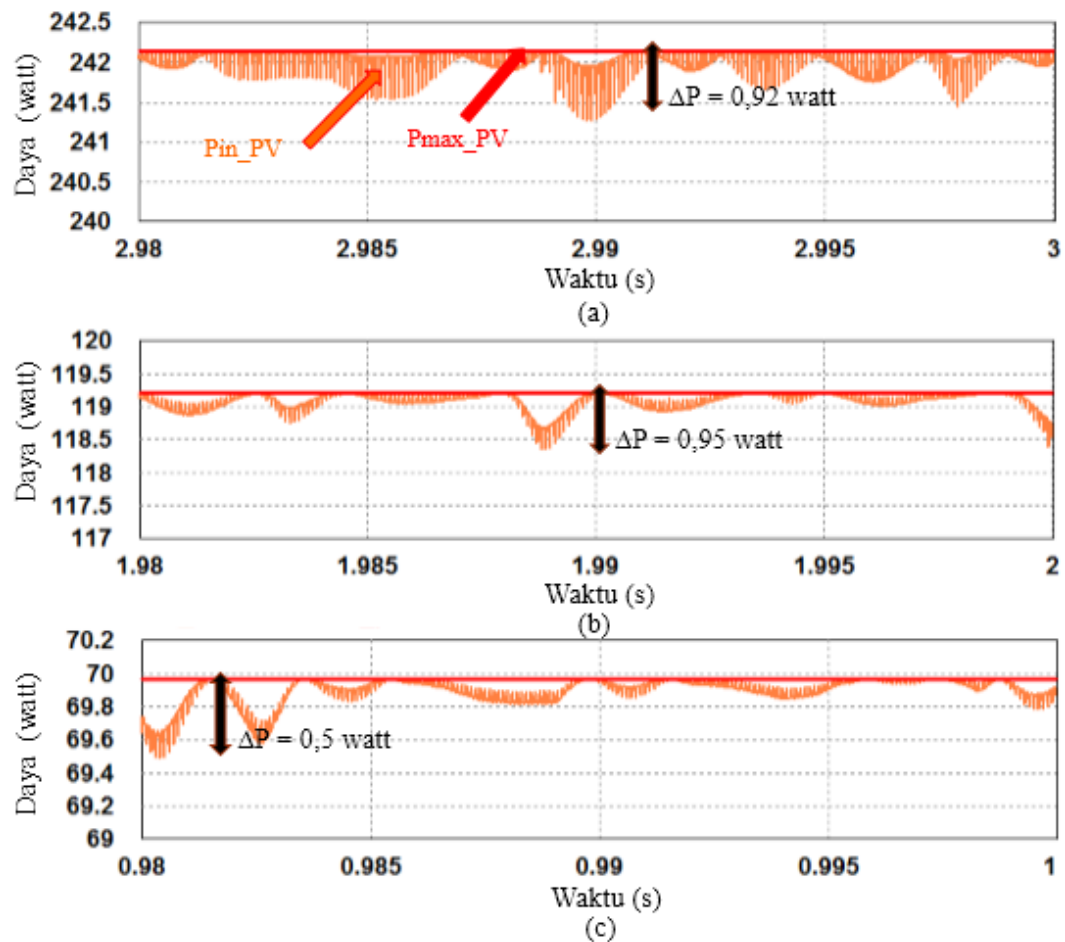
diketahui bahwa ketika irradiansi sinar matahari berubah maka titik operasi daya maksimum panel surya juga ikut berubah. Daya keluaran panel surya dapat dimaksimalkan dengan kontrol MPPT sehingga mampu mengikuti perubahan titik operasi daya maksimumnya. Ketika irradiansi mencapai 300 W/m^2 panel surya mampu menghasilkan daya sebesar 241,26 Watt, ketika irradiansi mencapai 500 W/m^2 panel surya mampu menghasilkan daya sebesar 118,35 Watt, ketika irradiansi mencapai 1000 W/m^2 panel surya mampu menghasilkan daya sebesar 69,48 Watt,



Gambar 4. 1 Respon perubahan a) irradiansi matahari; b) daya keluaran panel surya

4.1.2 Ripple Daya Steady State

Kontrol MPPT menghasilkan duty cycle untuk proses pensaklaran dalam mencari titik operasi daya maksimum. Efek perubahan duty cycle akan menyebabkan ripple daya keluaran panel surya yang ditunjukkan pada gambar 4.2.



Gambar 4. 2 Ripple daya keluaran panel surya dengan kontrol MPPT pada iradiasi : a) 1000 W/m^2 ; b) 500 W/m^2 ; c) 300 W/m^2

Dari gambar 4.2 dapat diketahui bahwa kontrol MPPT selalu memposisikan pada titik operasi daya maksimum panel surya dengan ripple daya dari daya terbangkit pada irradiasi 1000 W/m^2 sebesar 0,92 Watt (0,38%), pada irradiasi 500 W/m^2 sebesar 0,95 Watt (4,9%), pada irradiasi 1000 W/m^2 sebesar 0,5 Watt (0,71%). Hasil dari ripple daya yang kecil ini menunjukkan performa dari kontrol MPPT yang cukup baik.

4.1.3 Efisiensi Tracking MPPT Incremental Conductance

Sistem kontrol MPPT menunjukkan kinerja yang baik bila memiliki efisiensi tracking yang baik. Berikut adalah data efisiensi dari kontrol MPPT pada panel surya yang ditunjukkan pada tabel 4.1. Dari tabel 4.1 dapat diketahui bahwa

efisiensi kontrol MPPT dengan incremental conductance variabel step dapat menghasilkan efisiensi yang baik sebesar 99%. Nilai step bervariasi seiring perubahan nilai slope ($\Delta P/\Delta V$). Hal ini menunjukkan performa kontrol yang sangat baik.

Tabel 4. 1 Efisiensi kontrol MPPT pada PLTS dengan algoritma IC variabel step

Irradiasi (W/m^2)	$P_{\text{max-PV}}$ (Watt)	P_{mppt} (Watt)	η_{MPPT} (%)
1000	242,13	241,26	99,6%
500	119,21	118,35	99,2%
300	69,96	69,48	99,3%

4.2 Analisis Sistem Kontrol MPPT pada PLTB

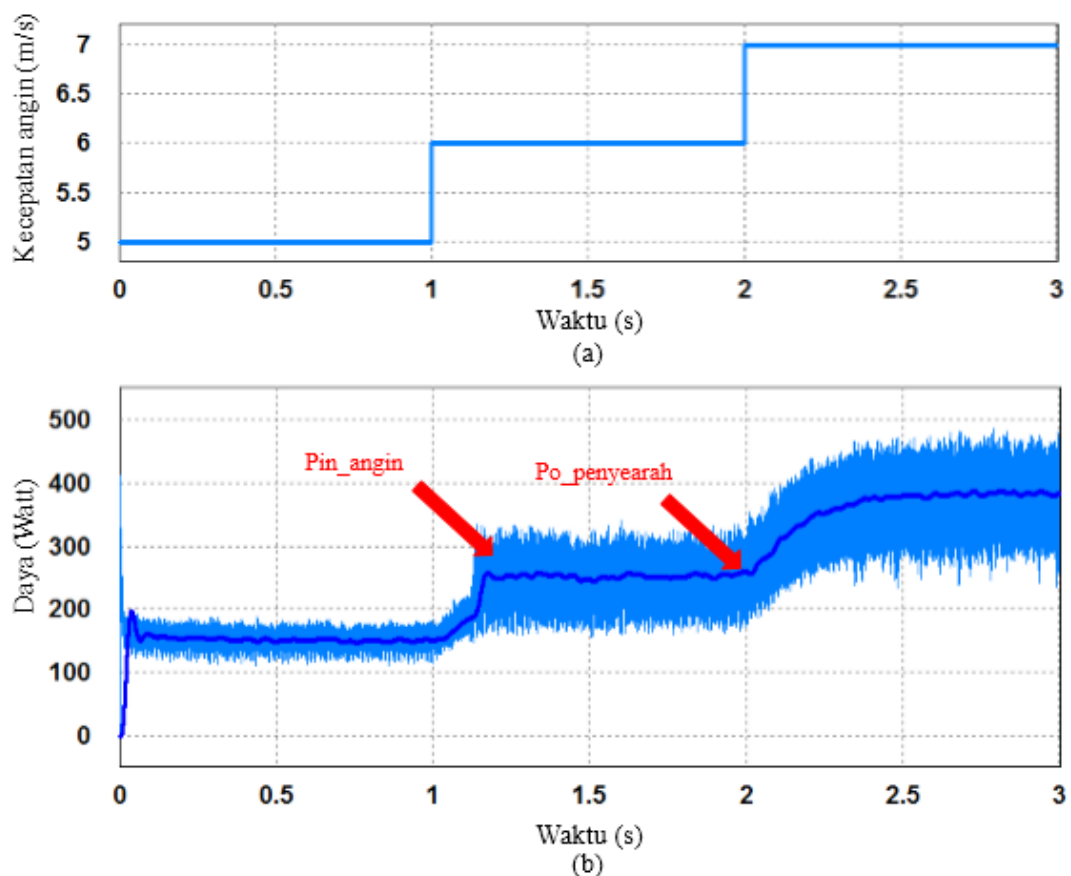
Efisiensi energi yang baik akan dapat dicapai ketika pembangkit mampu membangkitkan daya maksimumnya. Sistem PLTB juga dioperasikan pada kondisi daya maksimum yang mampu dihasilkan oleh sistem. Daya keluaran penyearah pada PLTB dikontrol dengan sistem kontrol MPPT dengan masukan berupa tegangan dan arus keluaran rectifier (V_{rec} dan I_{rec}) dengan duty cycle sebagai keluaran kontroler untuk mentrigger saklar boost konverter. Kontroler dengan algoritma kontrol incremental conductance akan menggunakan nilai V_{rec} dan I_{rec} yang terukur untuk menghasilkan duty cycle hingga PLTB mampu mencapai titik daya maksimumnya.

Titik operasi daya maksimum PLTB akan dicapai ketika slope daya dan tegangan yang terukur dengan daya dan tegangan sebelumnya ($\Delta P/\Delta V$) bernilai nol. Kondisi tersebut juga dicapai ketika ΔV bernilai nol dan ΔI bernilai nol. Bila daya terbangkit telah maksimum, maka keluaran duty cycle akan dipertahankan pada nilai sebelumnya. Beberapa respon aliran daya PLTB ditampilkan untuk dapat melihat performa dari kontrol MPPT dengan algoritma Incremental conductance.

4.2.1 Respon Perubahan Daya Akibat Perubahan Kecepatan Angin

Perubahan titik operasi daya maksimum sistem PLTB dipengaruhi oleh kecepatan angin. Ketika kecepatan angin berubah maka titik operasi daya

maksimum juga berubah. Dengan kontrol MPPT titik operasi daya maksimum PLTB akan dipertahankan maksimum. Respon perubahan daya tersebut ditunjukkan pada gambar 4.3. Dari gambar 4.3 dapat diketahui bahwa ketika kecepatan angin mencapai 5 m/s dengan kontrol MPPT dengan algoritma incremental conductance dapat menghasilkan daya sebesar 149,4 Watt, ketika kecepatan angin mencapai 6 m/s dengan kontrol MPPT dapat menghasilkan daya sebesar 256,66 Watt, ketika kecepatan angin mencapai 7 m/s dengan kontrol MPPT dapat menghasilkan daya sebesar 383,41 Watt,

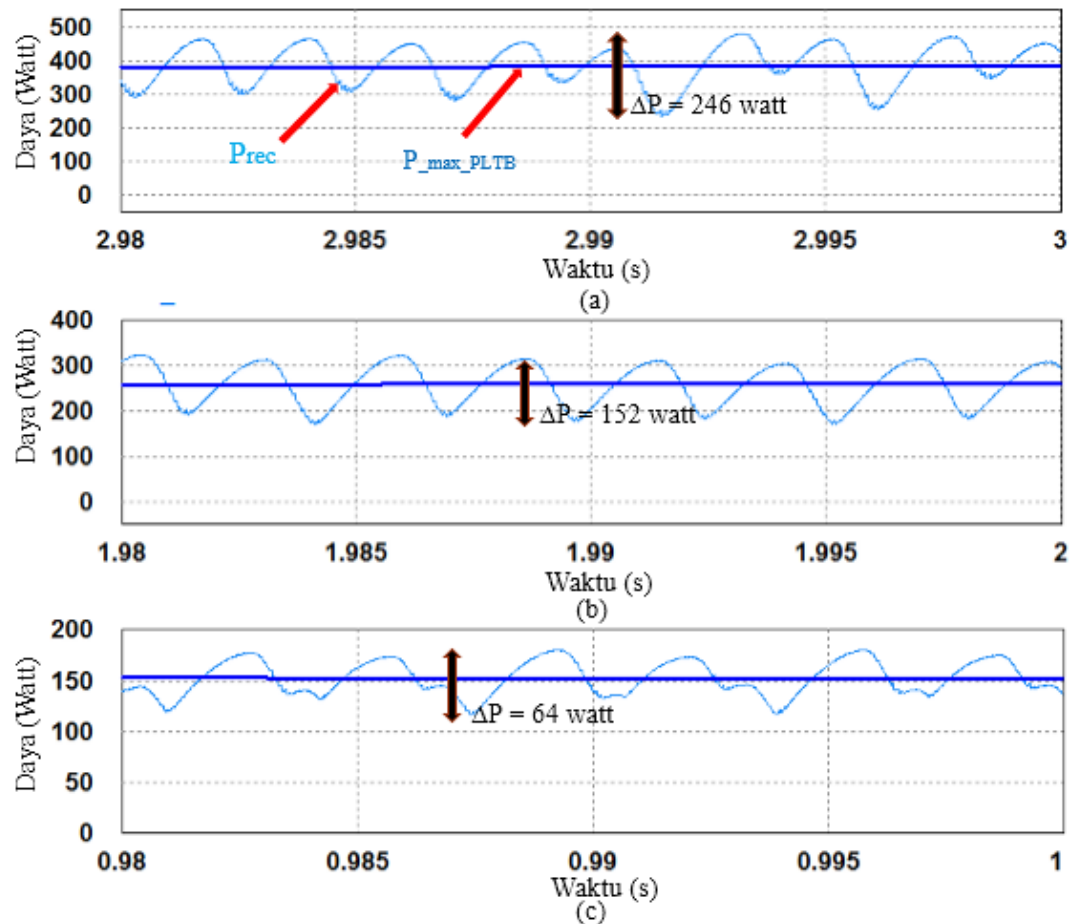


Gambar 4. 3 a) Perubahan kecepatan angin; b) Respon daya keluaran PLTB

4.2.2 Ripple Daya PLTB dengan Kontrol MPPT

Dari gambar 4.4 dapat diketahui bahwa ripple daya ketika kecepatan angin mencapai 5 m/s adalah sebesar 246 Watt (60,7%), ketika kecepatan angin mencapai 6 m/s adalah sebesar 152 Watt (59,1%), ketika kecepatan angin mencapai 5 m/s adalah sebesar 64 Watt (42,6%). Dari data tersebut diketahui bahwa ripple yang

dihasilkan oleh kontrol MPPT pada PLTB masih cukup besar, sehingga bila dilihat dari kualitas dayanya masih kurang baik. Hal ini dikarenakan pengukuran tegangan dan arus dilakukan disisi filter LC dari keluaran rectifier PLTB. Sementara ripple daya yang dihasilkan oleh penyearah sudah cukup kecil.



Gambar 4. 4 Ripple daya keluaran PLTB dengan kontrol MPPT ketika kecepatan angin, a) 7 m/s; b) 6 m/s; c) 5 m/s

Tabel 4. 2 Efisiensi kontrol MPPT pada PLTB dengan algoritma incremental conductance

Kecepatan angin (m/s)	$P_{max-mek}$ (Watt)	$P_{max-elek}$ (Watt)	P_{mppt} (Watt)	η_{Gen} (%)	η_{MPPT} (%)
5	178	150	149,4	84,2%	99%
6	305	257	256,66	84,2%	99,8%
7	473	405	383,41	85,6%	94,6%

4.2.3 Efisiensi Tracking Kontrol MPPT pada PLTB

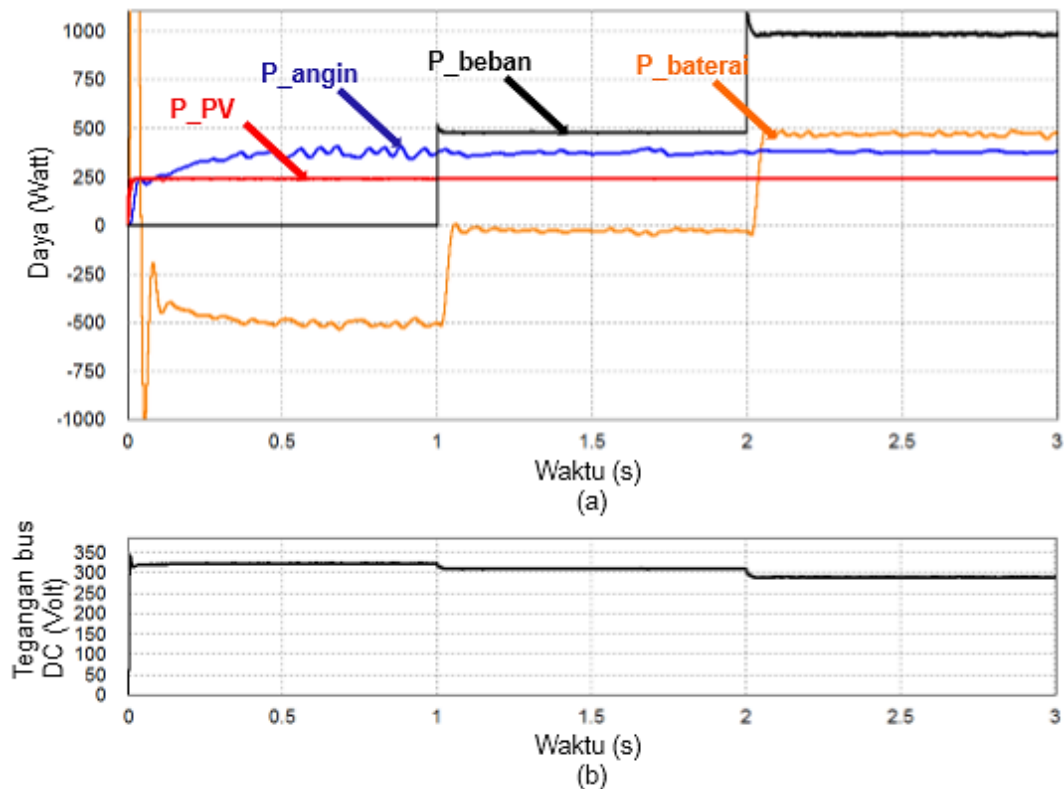
Kinerja dari kontrol MPPT dapat dilihat dari efisiensi antara daya terbangkit dengan daya maksimumnya. Bila besar daya terbangkit PLTB nilainya mendekati atau sebanding dengan daya maksimumnya maka dapat disimpulkan bahwa kontrol MPPT pada PLTB telah bekerja dengan baik. Data efisiensi dari kontrol MPPT pada PLTB yang ditunjukkan pada tabel 4.2. Dari tabel 4.2 dapat diketahui bahwa efisiensi kontrol MPPT pada PLTB dengan algoritma incremental conductance mencapai 99% pada kecepatan angin 5 m/s, 99,8% pada kecepatan angin 6 m/s dan 94,6% pada kecepatan angin 7 m/s. Hal ini menunjukkan performa kontrol yang sangat baik.

4.3 Analisis Sistem Kontrol Droop pada BMS

Pada sistem hibrid yang diajukan ini, sistem BMS dioperasikan pada kondisi charging maupun discharging tergantung kondisi masukan daya dari sistem pembangkit hibrida dan beban. Ketika daya masukan lebih besar dari beban ($P_{in} > P_{beban}$), maka konverter bidirectional pada BMS akan dioperasikan pada mode charging. Sebaliknya, ketika daya masukan lebih kecil dari beban ($P_{in} < P_{beban}$), maka konverter bidirectional pada BMS akan dioperasikan pada mode discharging. Kondisi tersebut ditunjukkan pada gambar 4.6. Penentuan kedua mode ini didasarkan pada sensing tegangan dan arus keluaran konverter bidirectional. Tegangan keluaran konverter bidirectional sama dengan tegangan Bus DC. Ketika tegangan bus DC lebih besar dari 311 Volt, BMS dalam mode charging, sementara ketika tegangan bus DC kurang dari 311 Volt, BMS dalam mode discharging. Kondisi tersebut sesuai dengan kurva droop yang telah dirancang. Daya keluaran baterai dikontrol dengan sistem kontrol droop dengan masukan berupa tegangan dan arus keluaran konverter bidirectional (V_{o-BMS} dan I_{o-BMS}). Keluaran kontrol droop berupa tegangan droop (V_{droop}) sebagai referensi kontrol tegangan pada kontroller PI untuk menghasilkan duty cycle pada pensaklaran konverter bidirectional.

4.3.1 Respon Daya Sistem Saat Mode Charging dan Discharging

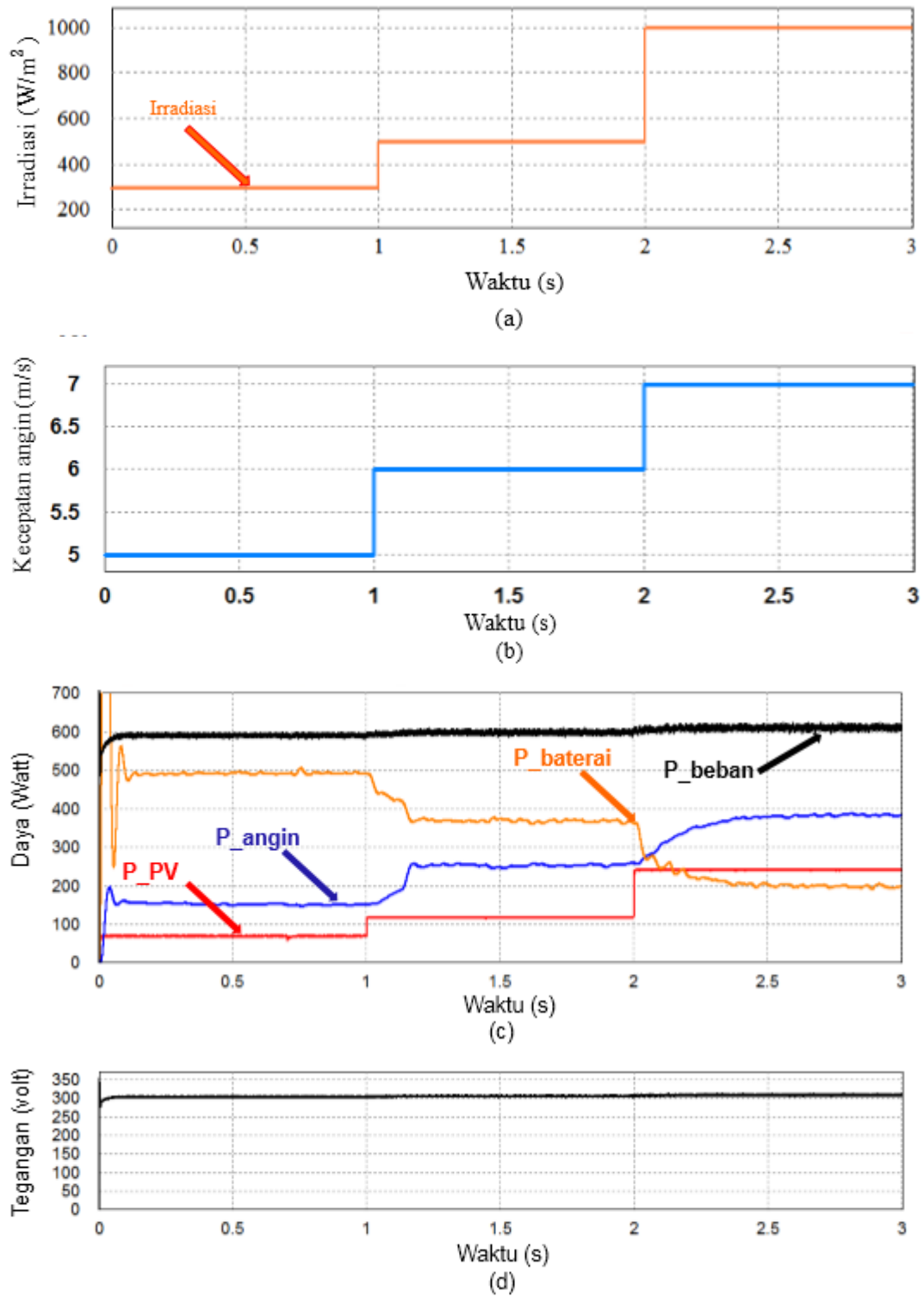
Simulasi dilakukan dengan beberapa kondisi untuk mengetahui respon sistem terhadap perubahan daya masukan dan beban. Kondisi SOC baterai adalah 40%, kecepatan angin sebesar 7 m/s dan iradiasi matahari sebesar 1000 W/m^2 . Respon aliran daya sistem ketika terjadi perubahan beban ditunjukkan pada gambar. 4.5.



Gambar 4. 5 Respon aliran daya sistem ketika P_{in} konstan dan beban berubah.

Dari gambar 4.5 dapat diketahui bahwa sistem mendapat masukan daya tetap dari PV dan PLTB. Ketika beban lebih kecil dari daya pembangkitan ($P_{in} > P_{beban}$), kelebihan daya sistem akan digunakan untuk mengisi baterai. Ketika beban lebih besar dari daya pembangkitan ($P_{in} < P_{beban}$), kekurangan daya sistem akan disuplai oleh baterai. Respon aliran daya sistem ketika terjadi perubahan daya masukan dengan beban tetap ditunjukkan pada gambar 4.6. Dari gambar 4.6 dapat diketahui bahwa beban sistem tetap dan sistem mendapat masukan daya yang bervariasi dari PV dan PLTB. Ketika beban lebih besar dari daya pembangkitan ($P_{in} < P_{beban}$), maka sistem akan mengalami kekurangan daya. Kekurangan daya sistem akan disuplai oleh baterai sesuai dengan kebutuhan beban. Dari kondisi tersebut,

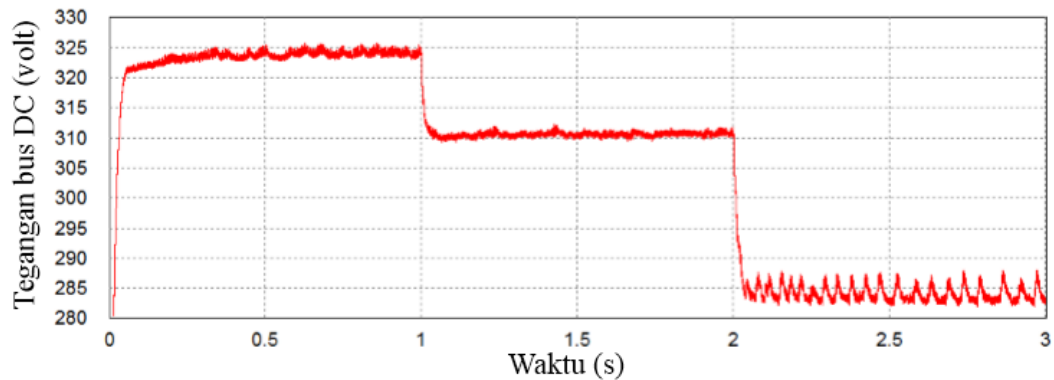
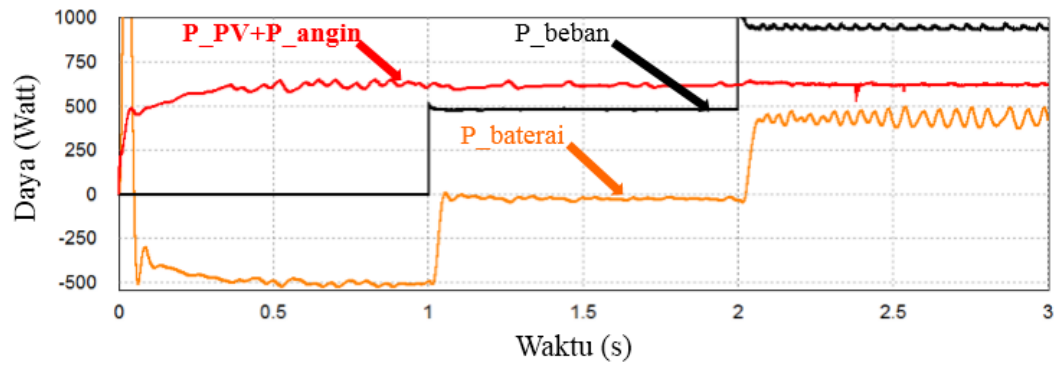
kontrol droop dapat meregulasi tegangan bus DC ketika terjadi perubahan daya sistem.



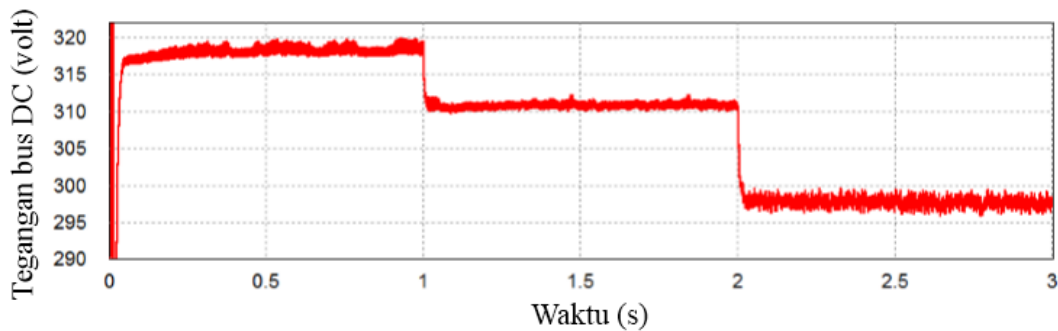
Gambar 4. 6 a) perubahan iradiasi matahari; b) perubahan kecepatan angin; c) respon aliran daya sistem ketika P_{in} berubah dan beban tetap; d) tegangan bus DC

4.3.2 Respon Tegangan Bus DC

Kontrol droop juga dapat digunakan untuk meregulasi tegangan bus DC dengan range tegangan tertentu dan resistansi droop (R_d) tertentu. Untuk mengetahui efek dari nilai R_d atau dapat juga diartikan dengan nilai slope tertentu, maka dalam thesis ini regulasi tegangan dirancang $\pm 10\%$ dari 311 Volt dengan R_d sebesar -9,1884 dan $\pm 2\%$ dengan R_d sebesar -4,7339. Simulasi dilakukan pada kecepatan angin 7 m/s, irradiansi 1000 W/m², SOC baterai 40% dan beban berubah.



(a)



(b)

Gambar 4. 7 Respon tegangan saat P_{in} tetap beban berubah dengan a.) $R_d = -9,1884$; b.) $R_d = -4,7339$.

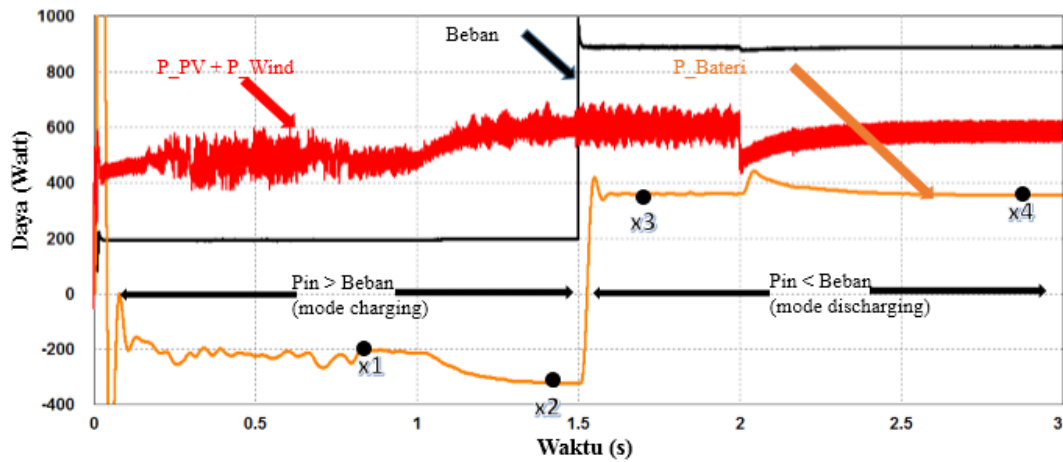
Dari gambar 4.7 diketahui bahwa ketika terjadi perubahan beban, tegangan bus DC dapat dipertahankan sesuai regulasi dengan ripple tegangan pada kondisi daya charging/discharging maksimum (500 Watt) adalah sebesar 12,2% dengan R_d sebesar -9,1884, dan 7,7% dengan R_d sebesar -4,7339. Selisih nilai perancangan dengan simulasi ini dikarenakan penentuan besar kecilnya nilai dari komponen induktor dan kapasitor dari masing – masing sistem dan keakuratan nilai konstanta K_p dan T_i pada kendali PI. Semakin kecil nilai R_d maka fluktuasi tegangan bus DC juga akan semakin kecil, sementara bila nilai R_d terlalu kecil maka respon tegangan sistem akan sangat sensitif terhadap perubahan daya masukan maupun perubahan beban. Sehingga dapat menyebabkan ketidakstabilan pada sistem.

4.3.3 Perbandingan Perancangan Dengan Hasil Simulasi

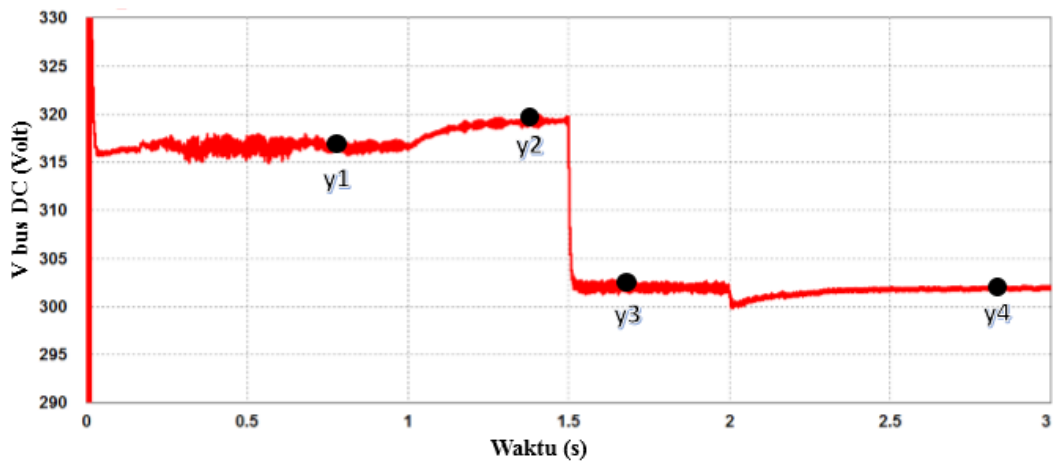
Untuk melihat performa dan keakuratan sistem kontrol maka dilakukan komparasi antara perancangan dengan hasil simulasi sistem. Berikut perbandingannya diambil dari beberapa titik pada hasil simulasi yang ditunjukkan pada gambar 4.8 yang dibandingkan dengan nilai perancangan awal.

Tabel 4. 3 Pengukuran daya dan tegangan hasil simulasi di beberapa titik

Titik Sampel	Mode	Daya baterai (Watt)	Tegangan bus DC (Volt)
x1	charging	-201	316,3
x2	charging	-320	319,4
x3	discharging	362	302,4
x4	discharging	375	301,9



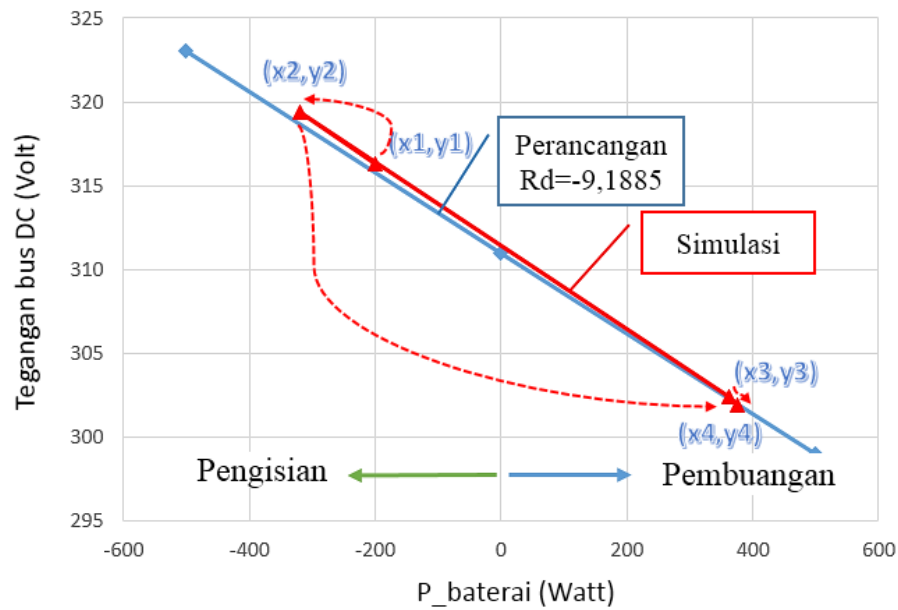
(a)



(b)

Gambar 4. 8 Hasil simulasi; a.) sampel respon aliran daya baterai; b.) sampel respon tegangan bus DC.

Simulasi dilakukan pada kondisi daya masukan dari PLTS dan PLTB berubah dan daya beban berubah. Dari simulasi tersebut terdapat 2 kondisi pada BMS yaitu kondisi charging (ketika $P_{in} > \text{beban}$) dan discharging ($P_{in} < \text{beban}$) yang ditunjukkan pada gambar 4.8a. Tegangan bus DC juga ikut berubah seiring dengan perubahan daya dari BMS yang ditunjukkan pada gambar 4.8b.



Gambar 4. 9 Perbandingan antara perancangan dengan hasil simulasi

Dari hasil perbandingan antara hasil simulasi dengan perancangan ditunjukkan pada tabel 4.3 ditampilkan ke dalam grafik yang ditunjukkan pada gambar 4.9. Besarnya daya baterai dan tegangan bus DC hasil simulasi sudah sesuai dengan perancangan. Terdapat selisih antara hasil simulasi dan perancangan yang cukup kecil akibat penentuan konstanta sistem kendali yang kurang tepat dikarenakan sulitnya menentukan konstanta yang sesuai dan juga karena desain ripple arus dan tegangan masing – masing pembangkit hibrida. Desain ripple arus sebesar 10% dan desain ripple tegangan adalah sebesar 0,1% dari nilai nominal. Semakin kecil desain ripple maka dibutuhkan nilai induktor dan kapasitor juga akan semakin besar.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 5

PENUTUP

Dari hasil Analisis hasil simulasi dapat ditarik kesimpulan dari penelitian ini dan terdapat beberapa saran untuk penelitian berikutnya sebagai berikut :

5.1 Kesimpulan

Integrasi pembangkit EBT dengan baterai dapat dilakukan dengan baik. Pembangkit EBT dapat membangkitkan daya maksimumnya dengan ripple maksimal pada daya PV sebesar 4,9%, ripple maskimal pada daya PLTB sebesar 60,7% dan dapat langsung disalurkan ke bus DC. Jadi penambahan pembangkit baru dapat langsung dilakukan pada bus DC. Baterai dapat meregulasi kelebihan dan kekurangan daya sistem dengan kontrol droop dengan regulasi yang sudah dirancang dengan $R_d = -9,1885$. Tegangan bus DC dapat dijaga konstan 311 Volt dengan regulasi tegangan sebesar 12,2% pada daya maksimum 500 Watt. Semakin kecil nilai R_d maka akan didapatkan fluktuasi tegangan yang semakin kecil. Namun jika nilai regulasinya terlalu kecil akan menyebabkan respon sistem terlalu sensitif bila mengalami perubahan daya masukan dari pembangkit hibrid maupun saat terjadi perubahan beban yang signifikan.

5.2 Saran

Untuk penelitian selanjutnya penulis memberi beberapa saran sebagai berikut :

1. Untuk menjaga agar baterai tidak cepat rusak, dapat ditambahkan 1 buah baterai untuk dapat beroperasi secara bergantian dengan mempertimbangkan kondisi SOC maksimum dan minimum.
2. Ketika baterai sudah penuh maka perlu ditambahkan mode kontrol tegangan konstan untuk menjaga tegangan bus DC tetap konstan. Mode kontrol tegangan konstan ini dapat di paralel dengan kontrol MPPT dengan parameter nilai SOC maksimum untuk mengatur batas mode peralihannya.
3. Bila akan ditambahkan pembangkit baru maka dibutuhkan perhitungan untuk menentukan kapasitas baterai yang sesuai.

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR PUSTAKA

- [1] PLN, “RUPTL-PLN.” 2017.
- [2] Kementrian ESDM, “Rencana Umum Energi Nasional (RUEN) - EBT.” kementrian ESDM, 02-Mar-2017.
- [3] M. E. Ignasius Jonan, “Rasio Elektrifikasi Indonesia.” Jun-2017.
- [4] C. Gavriluta, J. I. Candela, J. Rocabert, A. Luna, and P. Rodriguez, “Adaptive Droop for Control of Multiterminal DC Bus Integrating Energy Storage,” *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 30, no. 1, pp. 16–24, Feb. 2015.
- [5] J. Wei and Z. Yu, “Load Sharing Techniques in Hybrid Power Systems for DC Micro-Grids,” in *2011 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference*, 2011, pp. 1–4.
- [6] T. Morstyn, B. Hredzak, V. G. Agelidis, and G. Demetriades, “Cooperative control of DC microgrid storage for energy balancing and equal power sharing,” in *2014 Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC)*, 2014, pp. 1–6.
- [7] K. Strunz, E. Abbasi, and D. N. Huu, “DC Microgrid for Wind and Solar Power Integration,” *IEEE J. Emerg. Sel. Top. Power Electron.*, vol. 2, no. 1, pp. 115–126, Mar. 2014.
- [8] N. R. Tummuru, M. K. Mishra, and S. Srinivas, “Integration of PV/battery hybrid energy conversion system to the grid with power quality improvement features,” in *2013 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT)*, 2013, pp. 1751–1756.
- [9] T. Dragičević, J. M. Guerrero, J. C. Vasquez, and D. Škrlec, “Supervisory Control of an Adaptive-Droop Regulated DC Microgrid With Battery Management Capability,” *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 29, no. 2, pp. 695–706, Feb. 2014.
- [10] A. Varghese, L. R. Chandran, and A. Rajendran, “Power flow control of solar PV based islanded low Voltage DC microgrid with battery management system,” in *2016 IEEE 1st International Conference on Power Electronics, Intelligent Control and Energy Systems (ICPEICES)*, 2016, pp. 1–6.
- [11] M. G. Villalva, J. R. Gazoli, and E. R. Filho, “Comprehensive Approach to Modeling and Simulation of PhotoVoltaic Arrays,” *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 24, no. 5, pp. 1198–1208, May 2009.
- [12] E. M. Fateev, *Wind Motors and Wind Power Stations*. Moscow, 1948.
- [13] Paul C. Krause, *Analysis of Electric Machinery and Drive Systems*, Second. IEEE press.
- [14] O. Tremblay, L. A. Dessaint, and A. I. Dekkiche, “A Generic Battery Model for the Dynamic Simulation of Hybrid Electric Vehicles,” in *2007 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, 2007, pp. 284–289.
- [15] “‘SGL100 Charge and Discharge Characteristic’, Product Catalogue Siklon Energi Nusantara, www.siklon.co.id.” .
- [16] F. Liu, S. Duan, F. Liu, B. Liu, and Y. Kang, “A Variable Step Size INC MPPT Method for PV Systems,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 55, no. 7, pp. 2622–2628, Jul. 2008.
- [17] “PSIM User Guide, Content, Renewable Energy.” .

- [18] S. M. Chen, T. J. Liang, L. S. Yang, and J. F. Chen, “A Boost Converter With Capacitor Multiplier and Coupled Inductor for AC Module Applications,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 60, no. 4, pp. 1503–1511, Apr. 2013.



DAFTAR RIWAYAT HIDUP

Andri Pradipta lahir di Madiun, Jawa Timur pada tanggal 24 September 1993. Penulis adalah anak pertama dari dua bersaudara dari pasangan Sudariyanto dan Samini. Penulis menempuh pendidikan dasar di TK Aisyiyah BA X Sangen hingga tahun 1999 dan SDN Sangen 2 pada tahun 2000-2005. Kemudian penulis melanjutkan pendidikan menengah di MTsN Sewulan Dagangan hingga tahun 2008 dan lulus dari SMAN 1 Geger tahun 2011. Dijenjang perguruan tinggi, penulis menempuh pendidikan D3 di Politeknik Elektronika Negeri Surabaya dan lulus tahun 2014. Kemudian melanjutkan pendidikan Lintas Jalus S1 di Institut Teknologi Sepuluh Nopember dan lulus tahun 2016. Kemudian melanjutkan pendidikan jenjang master di Institut Teknologi Sepuluh Nopember dan lulus tahun 2018

No. HP : 085736843439

Email : andri_sciences@yahoo.co.id

Halaman ini sengaja dikosongkan

LAMPIRAN

Program C blok algoritma MPPT IC

```
///  
static float MPPT_STEP = 0.001;  
double i,v,p,s;  
static double i_prev = 0.1;  
static double v_prev = 1;  
static double p_prev = 0;  
static double D = 0.6;  
static double D_prev = 0.6;  
  
double d_i, d_v, d_p, div, iv, ineq, der;  
  
const int min = 0;  
const int max = 1;  
  
v = x1;  
i = x2;  
  
p = v * i;  
d_p = p - p_prev;  
d_v = v - v_prev;  
d_i = i - i_prev;  
ineq = d_p/d_v;  
  
if (d_v >= -0.001 && d_v <= 0.001)  
{  
    s = 1;  
    if (d_i >= -0.001 && d_i <= 0.001)  
    {  
        s = 2;  
        D = D_prev;  
    }  
    else  
    {  
        s = 3;  
        if (d_i > 0)  
            D = D + MPPT_STEP;  
        else  
            D = D - MPPT_STEP;  
    }  
}  
else  
{
```

```

s = -1;
div = d_i/d_v;
iv = i/v;
y3 = div;
y4 = ineq;
if (div == -iv)
{
    s = -2;
    D = D_prev;
}
else
{
    s = -3;
    if (div > -iv)
        D = D - MPPT_STEP;
    else
        D = D + MPPT_STEP;
}
}

if (D>0.7)
    D = 0.7;
if (D<0.35)
    D = 0.35;

i_prev = i;
v_prev = v;
p_prev = p;
D_prev = D;
y1 = D;
y2 = d_v;

der = ineq;
if (ineq<0)
    der = -1*ineq;

MPPT_STEP = 0.00001*der;

```